

小净距隧道施工地层和隧道变形特征 及韧性评价研究

刘吉诚¹,张雪峰¹,甄玉超¹,林庆涛^{2*},杨成贺²,路德春²,杜修力²

(1.中建路桥集团有限公司,河北石家庄 050011; 2.北京工业大学岩土与地下工程研究所,北京 100124)

摘要:小净距隧道左右洞之间距离较小,后行隧道施工扰动极易威胁先行隧道的结构安全,实现小净距隧道工程中先行隧道结构抵抗后行隧道施工扰动能力和扰动后功能恢复能力的量化评估,即韧性评价,对于小净距隧道的安全建设具有重要意义。以新晋高速公路韩口隧道中小净距隧道为背景工程,考虑工程中V级围岩段隧道埋深和净距的变化,基于ABAQUS平台建立9种工况(3种埋深×3种净距)的有限元模型,并基于实测隧道拱顶沉降和收敛变形验证数值模型的合理性。研究发现,相较于水平收敛,后行隧道施工拱顶沉降对应的先行隧道功能降低更为显著,更适合作为韧性计算的指标。基于确定的韧性计算指标和性能演化规律,实现了各工况下抗力韧性和恢复韧性的指数计算。在相同埋深下,隧道净距从10 m增大到30 m,先行隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数提高1.0%~9.0%;在相同净距下,隧道埋深从150 m减小到50 m,先行隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数提高4.0%~12.0%。隧道净距越大、埋深越小,隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数越高,所有工况中仅埋深150 m、净距10 m的工况,先行隧道的韧性处于中韧性等级,其他工况下先行隧道为处于高韧性等级。本研究为小净距隧道的韧性设计与施工提供了量化评价方法,可为类似工程的建设提供参考。

关键词:小净距;深埋隧道;拱顶沉降;隧道功能;韧性评价

中图分类号:U45;TU452 **文献标志码:**A

引用格式:刘吉诚,张雪峰,甄玉超,等.小净距隧道施工地层和隧道变形特征及韧性评价研究[J].隧道与地下工程灾害防治,2026,8(1):73-87. LIU Jicheng, ZHANG Xuefeng, ZHEN Yuchao, et al. Study on the deformation features and resilience evaluation of tunnels in the construction of closely-spaced tunnels[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(1):73-87.

Study on the deformation features and resilience evaluation of tunnels in the construction of closely-spaced tunnels

LIU Jicheng¹, ZHANG Xuefeng¹, ZHEN Yuchao¹, LIN Qingtao^{2*},
YANG Chenghe², LU Dechun², DU Xiuli²

(1. China Construction Road and Bridge Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, Hebei, China;

2. Institute of Geotechnical and Underground Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The construction of closely-spaced tunnels, characterized by the limited clearance between adjacent drifts, posed significant challenges as the excavation of the subsequent tunnel could induce considerable disturbances that jeopardized the structural integrity of the pilot tunnel. Quantifying the resilience of the pilot tunnel—defined as its capacity to withstand construction-induced disturbances from the subsequent tunnel and to recover its functionality thereafter—was

收稿日期:2025-10-21;修回日期:2025-11-16;接受日期:2025-11-21;出版日期:2026-03-20

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52478383);国家自然科学基金杰青资助项目(52025084);国家重点研发计划资助项目(2022YFC3800901);北京市博士后资助项目(2024-ZZ-21);湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室开放基金资助项目(E22419)

第一作者简介:刘吉诚(1971—),男,北京人,高级工程师,主要研究方向为桥梁、隧道建设。E-mail:1062533816@qq.com

* 通信作者简介:林庆涛(1987—),男,山东聊城人,副研究员,硕士生导师,博士,主要研究方向为岩土与城市地下工程。

E-mail:linqingtao@bjut.edu.cn

therefore crucial for ensuring safety during the construction of closely-spaced tunnels. This study investigated the Hankou Spiral Tunnels, a closely-spaced tunnel complex within the Xinjin Expressway project. Finite element models for nine distinct scenarios, encompassing three varying burial depths and three clear distances in a Grade V rock mass, were developed using the ABAQUS platform. The validity of the numerical model was confirmed through comparison with field monitoring data, specifically tunnel crown settlement and convergence deformation. Analysis revealed that crown settlement induced by subsequent tunnel excavation led to more pronounced functional degradation of the pilot tunnel compared to horizontal convergence, establishing it as the more appropriate indicator for resilience quantification. Based on the identified resilience evaluation indicators and structural performance evolution patterns, both resistance resilience index and recovery resilience index were calculated for all working conditions. The results demonstrated that increasing the pillar width from 10 m to 30 m under constant burial depth conditions enhanced the resistance and recovery resilience indices by 1.0%-9.0%, while reducing the burial depth from 150 m to 50 m under constant pillar width conditions improved these indices by 4.0%-12.0%. Generally, larger pillar widths and shallower burial depths resulted in higher resilience indices, with only the scenario combining 150 m burial depth and 10 m pillar width classified as medium resilience level, while all other configurations achieved high resilience level. This research provided a quantitative assessment framework for resilience-oriented design and construction of closely-spaced tunnels, offering valuable references for similar underground engineering projects.

Keywords: closely-spaced; deep tunnel; crown settlement; tunnel functionality; resilience assessment

Received: 2025-10-21; **Revised:** 2025-11-16; **Accepted:** 2025-11-21; **Published:** 2026-03-20

0 引言

随着国家交通系统的快速发展,我国隧道建设的数量与规模在持续增长^[1-2],小净距隧道的应用变得越来越广泛^[3-7]。由于小净距隧道左右洞之间距离较小,后行隧道施工易对先行隧道的结构产生不利影响^[8-9],严重时会引起隧道大变形和损伤,为隧道的安全运行带来隐患。国内外学者围绕小净距隧道后行隧道施工对先行隧道的影响开展了大量研究。在后行隧道开挖过程中,开挖卸荷会打破初始地应力平衡,引发围岩应力重分布,所产生的附加荷载和变形会通过中间岩柱显著作用于先行隧道结构^[10-12]。这种相互作用可能导致先行隧道衬砌产生不对称位移、应力集中甚至开裂,从而削弱其结构完整性与长期耐久性^[13-19]。吴梦军等^[20]通过数值模拟与现场监测,系统分析不同开挖净距及掌子面纵向间距条件下小净距隧道的支护结构力学行为与变形规律,在此基础上提出先建与后行隧道之间的合理净距建议值;刘代国等^[21]指出,后行隧道开挖会在先行隧道中引起明显的附加应力与变形,其中径向应力以压应力为主,环向应力则主要表现为拉应力状态;扈萍等^[22]的研究表明,后行隧道施工显著加剧了先行隧道的变形,具体表现为拱顶沉降与仰拱隆起量的进一步增大;褚衍玉等^[23]重点探讨前后隧道掌子面间距对围岩应力状态的扰动特征,进

而提出基于应力优化控制的合理掌子面间距建议;Dhar等^[24]通过模型试验研究不同相对位置双线隧道的失效机理,指出破坏主要由中间岩柱的应力集中引发,并发现上下布置的洞室稳定性优于水平并列或45°斜向布置。现有研究多关注于先行隧道的响应规律和扰动状态,对于其扰动程度评价方法的研究较为缺乏。

在工程语境中,韧性被定义为系统在遭受外界扰动后,其维持自身功能的能力^[25],结构的韧性包括抗力韧性和恢复韧性^[26-28]。韧性评价方法的显著优势在于,既考虑了系统抵抗扰动的能力,又兼顾了系统受扰动后的恢复能力。近年来韧性评价方法开始应用于近接施工扰动对隧道结构的影响评价。Huang等^[29]提出在扰动后,性能曲线在扰动阶段和恢复阶段之间应该存在一个演化阶段,建立一种新的隧道衬砌韧性评价模型;林星涛等^[30]针对既有隧道多次上穿下穿的工程问题,构建多次扰动下的性能演化曲线模型,并将其应用于新建平行隧道下穿既有隧道的工程场景分析;朱旻等^[31]以地面堆载扰动既有盾构隧道为研究对象,提出考虑衬砌历史最大变形的衬砌性能指标计算公式,通过建立三维精细化有限元模型,深入研究不同埋深盾构隧道在地面堆卸载过程中结构响应特征及韧性演化规律;Jiang等^[32]针对基坑近接既有隧道施工工况,将性能指标定义为“纵向变形规范限值与 t 时刻纵向变形之差对纵向变形规范限值的比值”;Huang等^[29]

则针对地表堆卸载工况,将性能函数定义为“初始径向收敛与 t 时刻径向收敛的比值”,并基于现场监测数据开展韧性评价分析;Qiu等^[33]以具有大跨度屋顶结构的装配式车站为研究对象,考虑多次受灾作用影响,将性能函数定义为与装配接头处刚度相关的物理量,同时构建结构恢复成本计算体系,定义各项恢复成本计算公式,并对不同恢复方案的成本效益进行了对比分析;Han等^[34]提出涵盖既有结构特征、地层条件参数和施工扰动参数三方面的韧性评价指标体系,运用集对分析理论进行指标归一化处理,通过层次分析法与熵权法组合赋权,建立性能函数计算公式及基于最大损伤和累计损伤的韧性指数计算方法,并将该方法应用于双线隧道近接下穿地铁车站的工程案例,对比分析不同恢复措施下车站结构的韧性指数差异;此外,Lin等^[35]开展基坑开挖扰动下既有隧道的韧性评价研究,将性能指标定义为与隧道最大位移相关的物理量,通过采用微扰动注浆修复技术,完整绘制从扰动发生到功能恢复的全周期韧性演化曲线。韧性评价模型为分析近接施工对隧道结构的影响提供系统性的分析工具,其核心优势在于能够从全过程、多维度量结构在扰动作用下的性能演化规律,不仅关注结构的抗扰动能力,更强调其功能恢复的路径与效率。然而,现有关于小净距隧道施工的研究多集中于中间岩柱稳定性、先行隧道变形控制等抗力性能指标,仅一定程度上实现了抵抗能力的评估,缺乏对先行隧道结构抵抗能力和恢复能力的系统量化评估。因此,建立抗力与恢复双维度的韧性评价体系,是完善小净距隧道安全评价理论的关键方向。

本研究针对新晋高速公路韩口隧道中小净距隧道施工的典型工况,考虑工程中埋深和隧道净距的变化,首先利用ABAQUS建立9种工况(3种埋深×3种净距)的有限元模型,分析小净距隧道施工下地层和隧道结构的变形规律,然后基于后行隧道施工引起先行隧道的变形,计算各工况条件下先行隧道的韧性指数与恢复韧性指数,并确定其韧性等级。本研究实现了施工扰动下小净距隧道的韧性量化计算和评估,可为小净距隧道的韧性设计与施工提供参考。

1 韧性理论及评价模型

1.1 韧性理论

韧性起源于拉丁文 *resilio*, 译为“跳回”^[36], 表

示事物“回弹至初始状态”。韧性的概念最早应用于对生态系统的研究^[37], 此后扩展到材料科学、心理学、经济学和工程学等学术领域。韧性是个体或系统的一种内在能力, 能抵抗外部冲击、压力等不利作用, 并在有限的时间内快速恢复。韧性可分为抗力韧性和恢复韧性, 即抵抗和恢复两部分能力^[27]。抗力韧性指功能完备的个体或系统在外力作用下功能发生下降, 直至某一水平, 但仍保证关键功能不丧失的能力。恢复韧性指功能发生下降后的个体或系统通过恢复措施使得功能恢复至原有水平甚至更高水平的能力。

1.2 韧性评价模型及韧性指数计算

近接施工扰动作用下既有隧道的韧性指数计算模型如图1所示, 横坐标为时间 t , 纵坐标为 $Q_i(t)$, 表示随 t 时刻隧道结构的性能状态, 其范围为 $[0, 1]$, $S_1 \sim S_6$ 分别表示各区域面积, 既有隧道性能计算公式为

$$Q_i(t) = 1 - \frac{q_i(t)}{q_{i,\max}}, \quad (1)$$

式中, i 为性能指标编号, $q_{i,\max}$ 为既有隧道性能阈值, $q_i(t)$ 为既有隧道性能损失量。

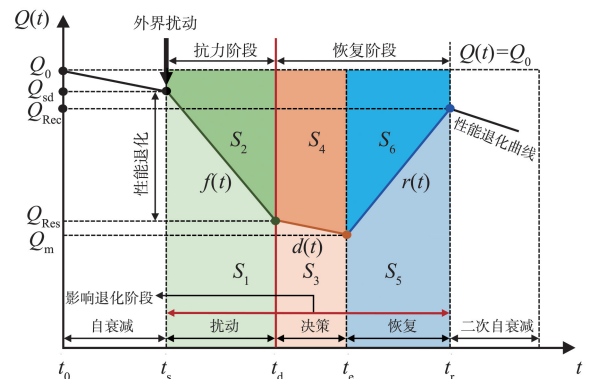


图1 韧性指数计算模型

Fig.1 Resilience index calculation model

近接施工扰动作用下,隧道性能随时间演化呈现5个阶段,依次为自衰减阶段、扰动阶段、决策阶段、恢复阶段和二次自衰减阶段。在自衰减阶段中(t_0-t_s),隧道建设完成后,受材料老化、环境侵蚀的影响,隧道结构老化性能衰减至 Q_{sd} ,功能曲线呈平缓下降趋势;在扰动阶段(t_s-t_d)中,当外部扰动荷载(如邻近施工、地震或地质活动)作用于隧道后,既有隧道受力和变形显著变化,其性能急剧下降至 Q_{Res} ,性能曲线呈现快速下降趋势,一般来说荷载强度越大,性能曲线下下降速率越快;在决策阶段(t_d-t_e)中,施工扰动结束后,根据既有隧道性能降低情况制定恢复方案,该段时间内既有隧道性能演

化趋于稳定或一定程度的波动,既有隧道性能演化至 Q_m ;在恢复阶段($t_e - t_r$)中,执行恢复措施后,既有隧道性能逐步恢复至目标值 Q_{Rec} ;二次自衰减阶段 t_r 后,恢复措施完成,既有隧道性能仍将随时间衰减,性能曲线呈平缓下降趋势。

既有隧道韧性包含抗力韧性和恢复韧性。为实现既有隧道在施工扰动期间维持结构性能能力的评价和扰动后性能恢复期间结构性能恢复能力的评价,需分别计算抗力韧性指数和恢复韧性指数。韧性指数定义为既有隧道受扰动作用影响后其性能演化曲线与坐标轴包围的面积和既有隧道初始功能与坐标轴包围的面积之比。对于抗力韧性指数

$$R_{ESQ_i} = \frac{\int_{t_a}^{t_d} Q_i(t) dt}{\int_{t_a}^{t_d} Q_0 dt} = \frac{S_1}{S_1 + S_2}, \quad (2)$$

式中, R_{ESQ_i} 为基于 Q_i 计算的抗力韧性指数, $Q_i(t)$ 根据式(1)进行计算。

对于恢复韧性指数

$$R_{ECQ_i} = \frac{\int_{t_d}^{t_r} Q_i(t) dt}{\int_{t_d}^{t_r} Q_0 dt} = \frac{S_3 + S_5}{S_3 + S_4 + S_5 + S_6}, \quad (3)$$

式中, R_{ECQ_i} 为基于 Q_i 计算的恢复韧性指数, $Q_i(t)$ 根据式(1)进行计算。

1.3 韧性等级划分

抗力韧性指数和恢复韧性指数计算的目的是实现既有隧道韧性等级的划分。现有关于韧性评价方法的研究中,都将韧性等级的评价划分为高韧性、中韧性、低韧性和无韧性四种等级,本研究关于韧性等级的划分采用已有研究的成果。

如图2所示,对于近接施工扰动工况,高韧性即韧性指数 $R_e \geq R_{EH}$,表示对于轻微扰动 F_1 作用下,后行隧道施工对先行隧道的影响程度低,先行隧道可快速恢复至要求的功能状态;中韧性即韧性指数 $R_{EM} \leq R_e < R_{EH}$,表示中等扰动 F_2 作用下,施工扰动主要影响了先行隧道的防水功能,但隧道结构的承载安全在可接受范围内,恢复措施的执行首先要提升隧道的防水功能;低韧性即韧性指数 $R_{EL} \leq R_e < R_{EM}$,表示严重扰动 F_3 作用下,施工扰动已导致先行隧道结构承载能力不足,存在结构失效风险,恢复措施的执行首先要提升隧道的承载能力;无韧性即韧性指数 $R_e < R_{EL}$,表示极端扰动 F_4 作用下,先行隧道完全丧失承载能力,结构整体稳定性破坏。

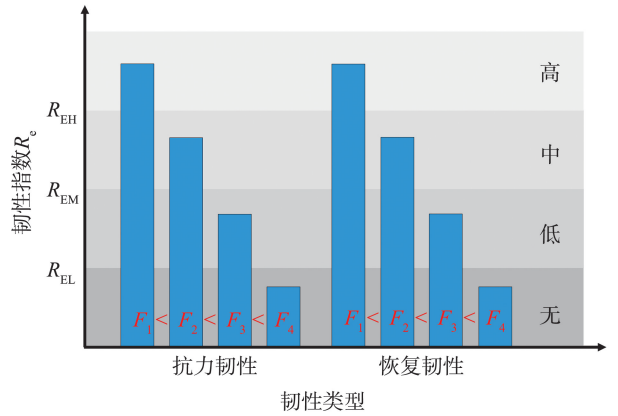


图2 韧性等级划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of resilience grading

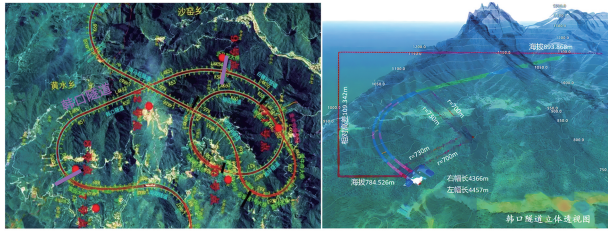
在对隧道韧性进行评估前,需要确定韧性等级的界限值,进而实现隧道韧性等级的划分。韧性等级的划分阈值的确定是实现韧性等级合理划分的关键,当前对于韧性等级划分阈值的研究仍处于探索阶段,尚未形成统一的阈值确定标准与方法。本研究采用的划分阈值,引用了林星涛^[30]建立的多次扰动下隧道结构韧性分析模型,针对隧道结构韧性等级的划分进行了定义,共分为四个等级: $R_e > R_{e0}$ 为高韧性、 $0.75R_{e0} \leq R_e < R_{e0}$ 为中韧性、 $0.5R_{e0} \leq R_e < 0.75R_{e0}$ 为低韧性以及 $R_e < 0.5R_{e0}$ 为无韧性,其中, R_e 为隧道结构韧性等级划分的界限值, R_{e0} 是由隧道结构正常衰减曲线计算获得的韧性指标值,一般接近于 1.00。

针对先行隧道在后行隧道的开挖扰动下实现既有隧道的韧性等级划分,本研究取 $R_{e0} = 0.9$,因此 $0.9 \leq R_e < 1$ 表示高韧性, $0.68 \leq R_e < 0.9$ 表示中韧性, $0.45 \leq R_e < 0.68$ 表示低韧性, $R_e < 0.45$ 表示无韧性。

2 小净距隧道施工地层和隧道变形规律分析

2.1 工程背景

新晋高速公路块村营至营盘(省界)段位于河南省新乡市境内,是连接豫、晋两省的沿太行山脉蜿蜒布线的高速通道。韩口隧道是新晋高速的重点控制性工程,其立体示意如图3所示。韩口隧道标段起止桩号为 K49+580—K54+110,全长 4.53 km,其中左线隧道长 4 457.0 m、最小曲线半径 730.0 m,右线隧道长 4 366.0 m、最小曲线半径 700.0 m,隧道海拔高度 784.526~893.868 m,进出口高差 109.342 m,是世界最长的小半径、大高差螺旋隧道。



(a) 螺旋隧道群分布图 (b) 韩口隧道立体图

图 3 韩口隧道示意图

Fig.3 Schematic diagram of the Hankou Tunnel

韩口隧道穿越区域地质条件复杂,沿线分布Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级三种围岩段,Ⅲ级围岩采用全断面光面爆破法,Ⅳ级围岩采用上下台阶法开挖,Ⅴ级围岩采用环形开挖预留核心土法开挖。其中,韩口隧道Ⅴ级围岩段具有自稳性差,强度低,易软化崩解等特性,且面临净距小,高埋深的突出挑战。鉴于Ⅴ级围岩段施工风险高、技术难度大,是制约工程安全与进度的关键区段,本研究将针对韩口隧道Ⅴ级围岩段展开分析,后续所述工程参数、监测数据均特指Ⅴ级围岩段工况。

2.2 地层信息和隧道施工方法

工程中Ⅴ级围岩主要分布在隧道进口段,该区段范围内隧道埋深和净距变化显著,增加了隧道施工安全控制的难度。隧道进口段纵剖面图如图 4 所示,该区段内隧道埋深范围为 20~200 m,净距范围为 10~30 m。工程中对 LK50+540—LK50+600 区段(区域 C)左线和右线隧道的拱顶沉降和水平收敛进行系统监测,可为数值分析提供验证和支撑,以该区段的地层和隧道施工信息为基础建立数值模型。区域 C 断面地层和隧道断面信息如图 5 所示,两座隧道高度均为 10.2 m,宽度均为 12.6 m,拱顶埋深为 150.0 m 左右,两座隧道外墙间距 20.0 m 左右,地层为中风化砂岩,厚度为 190.0 m;工程中对两隧道变形进行了监测,其中测点 E_1 和 E_2 分别监测左右两隧道的拱顶沉降, A_1 和 B_1 、 A_2 和 B_2 测点分别用于监测左右两隧道的周边位移。区域 C 区段左、右线隧道均采用环形开挖预留核心土法进行开挖,先开挖左线隧道,后开挖右线隧道,开挖步骤如图 6 所示。

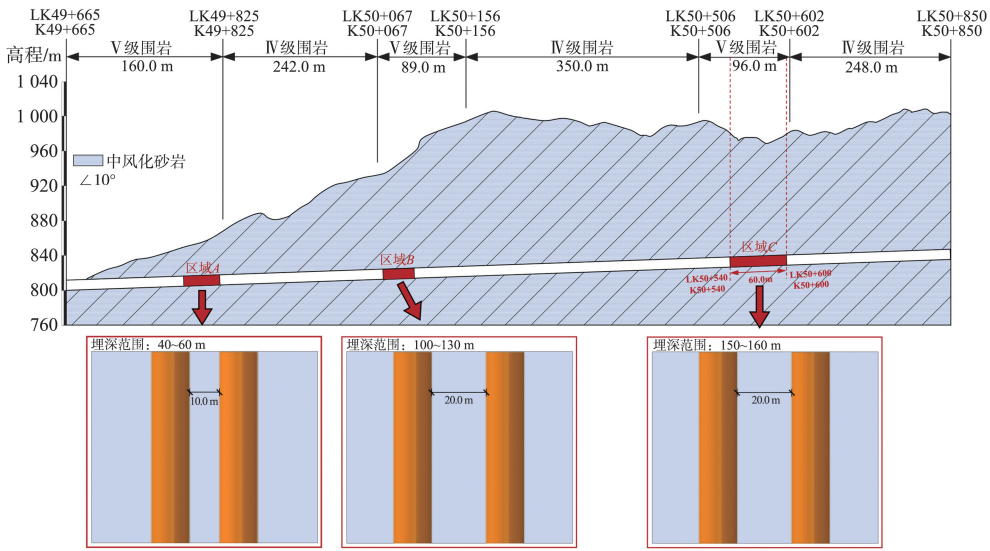


图 4 韩口隧道纵向地质剖面图

Fig.4 Longitudinal geological profile of Hankou tunnel

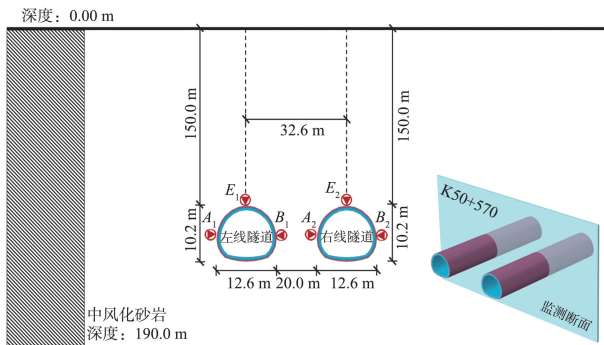
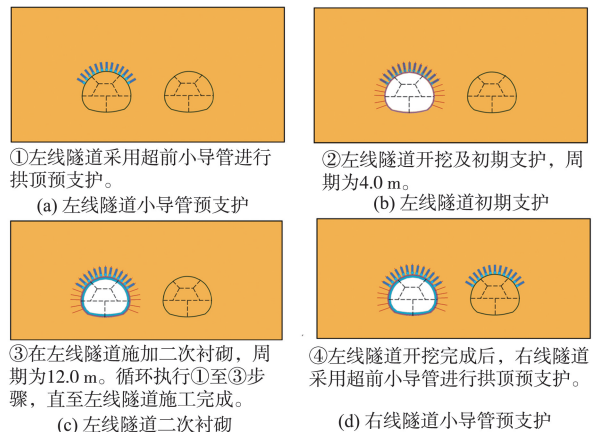


图 5 地层剖面及隧道几何信息

Fig.5 Geometry information for the stratum and tunnels



①左线隧道采用超前小导管进行拱顶预支护 (a) 左线隧道小导管预支护

②左线隧道开挖及初期支护,周期为4.0 m (b) 左线隧道初期支护

③在左线隧道施加二次衬砌,周期为12.0 m。循环执行①至③步骤,直至左线隧道施工完成 (c) 左线隧道二次衬砌

④左线隧道开挖完成后,右线隧道采用超前小导管进行拱顶预支护 (d) 右线隧道小导管预支护

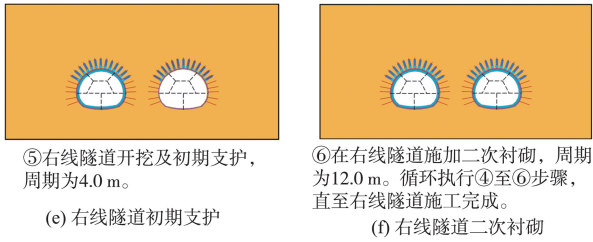
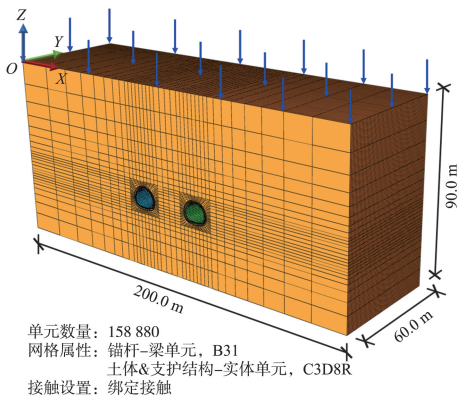


图6 隧道施工步序示意图

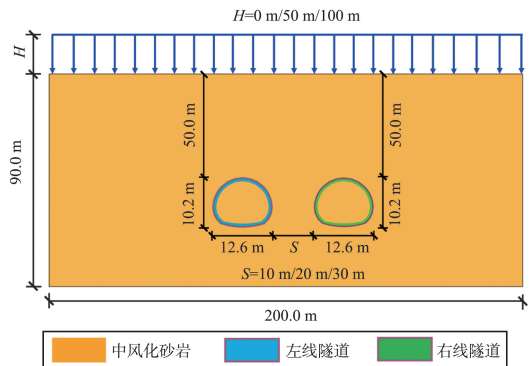
Fig.6 Schematic diagram of tunnel construction steps

2.3 数值模型

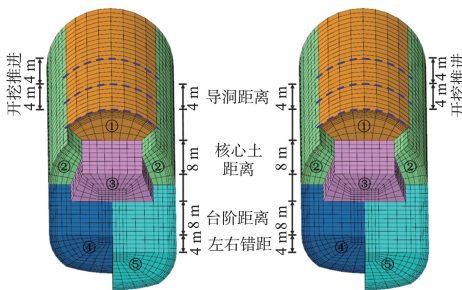
为进一步明确韩口隧道开挖对地层及隧道结构的影响,利用 ABAQUS 平台建立了精细的有限元模型,模型对标实际工程采用的环形开挖预留核心土施工工艺,结合工程平均 4 m/d 的开挖进尺,将数值模拟的每个开挖步的进尺设定为 4 m,确保模拟的开挖步序、进尺与实际工程完全一致。同时,通过现场实测数据对比模拟数据,进而验证数值模型的合理性。



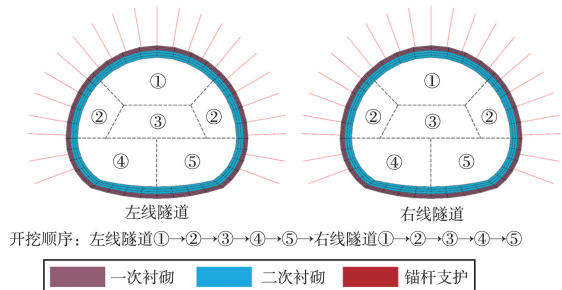
(a) 有限元模型几何网格



(b) 有限元模型示意图



(c) 隧道开挖方法



(d) 开挖顺序及支护结构图

图7 隧道的有限元模型

Fig.7 Finite element model of tunnel

在数值模型中,采用场变量法实现岩体力学参数的变化,将超前小导管加固区域内的岩体力学参数(如弹性模量、黏聚力)进行显著提升,以模拟注浆胶结强化效应。这一改变通过在定义材料属性时,将参数设置为场变量的函数来实现;随后,根据加固区的几何坐标,在注浆分析步中将该区域内单元的场变量值激活,从而瞬间“切换”为强化后的材

2.3.1 数值模型建立

依据图 5 所示的工程信息,基于 ABAQUS 平台建立了有限元数值模型,如图 7(a)~(b)所示,模型宽度为 200.0 m,纵向长度为 60.0 m(隧道开挖方向),深度 90.0 m,为提高计算效率,在模型表面施加 2.156 MPa 的法向应力,用于等效 100.0 m 围岩荷载。数值模型中,地质条件和隧道的几何尺寸及空间位置与实际工程相一致。岩体和隧道支护结构单元均选用实体单元 C3D8R,锚杆支护单元选用线性梁单元 B31,模型共包含 158 880 个单元。模型底部边界位移完全约束;四个垂直侧边界仅在法线方向上受到约束;顶面自由,允许水平和垂直位移。

左线和右线隧道的施工顺序如图 7(c)~(d)所示。岩体单元的开挖和支撑结构单元的添加采用“生死单元法”技术,使用“杀死”命令实现岩体单元的开挖,使用“激活”命令实现支撑结构单元的添加,包括:初衬、锚杆和二砌。

料参数,进而改变加固区域内岩体的力学特性来控制隧道开挖引起的地层和结构变形。岩体与隧道支护结构及其邻近支护结构的接触行为采用“绑定”接触来描述。暗挖隧道现场施工工艺主要包括超前小导管预加固、岩体开挖、一次衬砌及锚杆支护施工、二次衬砌施工 4 个步骤。实现了双线隧道关键施工步骤的模拟,详细过程如图 8 所示。

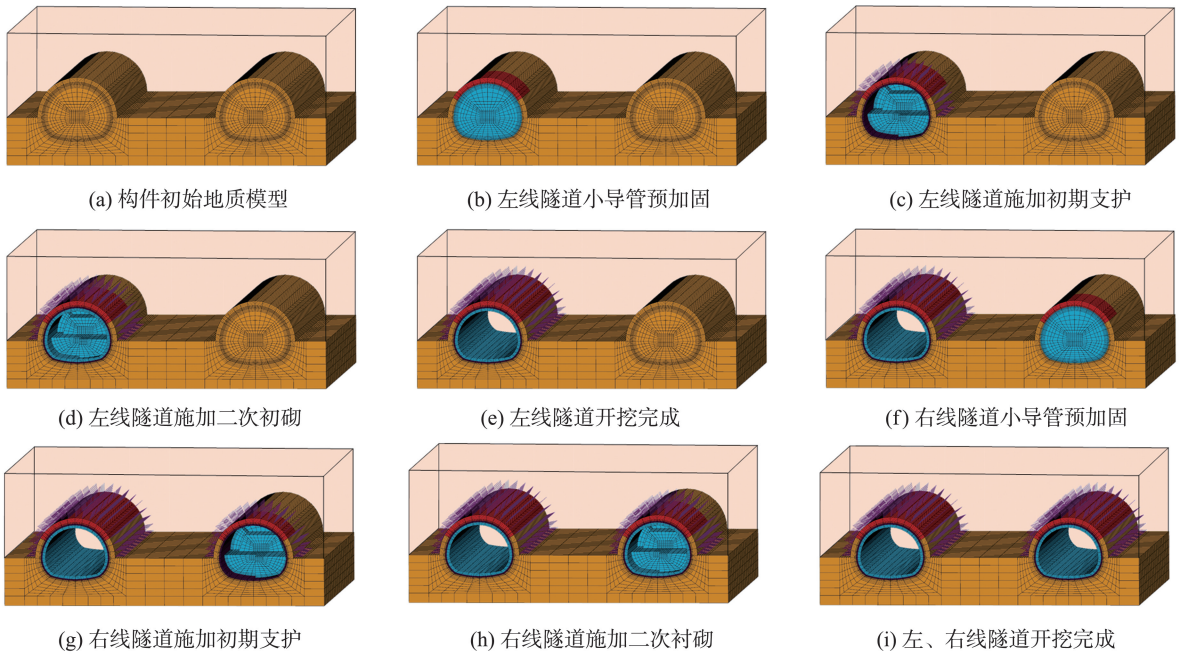


图 8 施工模拟过程流程图

Fig.8 Construction process simulation flow chart

2.3.2 模拟工况

实际工程中,左右线隧道平行施工时,隧道净距与埋深的显著变化是诱发施工风险的主要因素,而施工中隧道曲率对地层及隧道响应的影响远小于埋深和隧道净距的影响;同时结合图 3 所示的隧道空间位置可知,韩口隧道标段未涉及上升后小净距隧道间上下交叠的情况,因此本研究未针对隧道曲率及隧道交叠工况展开分析。为高效实现研究目标,数值模型建立时将曲线隧道简化为直线隧道,并选取隧道埋深与净距作为核心变动因素,设计了 9 种计算工况,隧道埋深分别为 50、100、150 m,即 $H=0$ 、50、100 m;隧道净距分别为 10、20、30 m,即 $S=10$ 、20、30 m, H 代表岩体上表面岩体等效荷载的垂直高度; S 代表隧道净距。工况编号见表 1。

表 1 模拟工况编号

Table 1 Simulation condition number 单位:m

工况编号	隧道埋深	隧道净距
M50-J10	50	10
M50-J20	50	20
M50-J30	50	30
M100-J10	100	10
M100-J20	100	20
M100-J30	100	30
M150-J10	150	10
M150-J20	150	20
M150-J30	150	30

2.3.3 材料参数

在数值模型中,岩体和岩体加固区的力学特性

均采用 Mohr-Coulomb 本构模型描述,而所有支护结构的力学特性均采用弹性本构模型描述。岩体及支护结构物理力学参数见表 2。

表 2 材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of materials

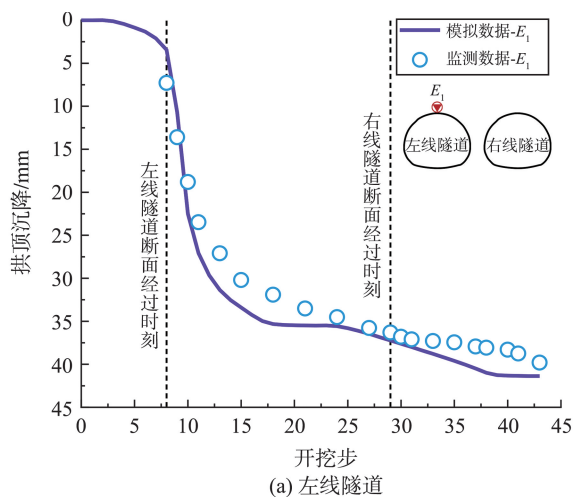
名称	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩 擦角/ $(^\circ)$
中风化砂岩	2 200	1 200	0.35	50	25
中风化砂岩 加固区	2 400	1 500	0.30	150	25
超前小导管	2 400	3 000	0.30	300	30
一次衬砌	2 300	20 000	0.25		
二次衬砌	2 500	23 000	0.20		
锚杆支护	7 850	180 000	0.20		

2.3.4 数值模型验证

为实现现场实测数据与模拟数据的对比与模型验证,本研究以数值模型中掌子面开挖至监测点位置时获得的拱顶超前沉降数值结果对实测拱顶沉降结果进行了修正。本质上来讲,是以隧道开挖通过监测点断面后测点拱顶沉降的增量对数值模型的合理性进行验证。

为验证数值模型的准确性,选取 E_1 、 E_2 典型监测点的竖向位移时程数据和 A_1B_1 、 A_2B_2 监测线的水平收敛时程数据与模拟结果进行对比分析。 E_1 和 E_2 监测点的拱顶沉降时程曲线如图 9 所示,其中蓝色实圆为实测数据,紫色实线为模拟结果。由图 9 可知,模拟曲线与实测数据吻合良好,最大误差小于 10%,表明模型能准确反映拱顶沉降趋

势,证明了数值模型的合理性。 A_1B_1 和 A_2B_2 监测线的水平收敛时程曲线如图10所示,其中蓝色实圆为实测数据,紫色实线为模拟结果。结果显示,模拟结果与实测数据吻合较好,误差范围控制在允许范围



内,进一步证明了数值模型的合理性。确定数值模型的合理性后,接着进行了工况1至工况9数值模型的计算,下文以此为基础分析了地层及隧道结构的变形特征。

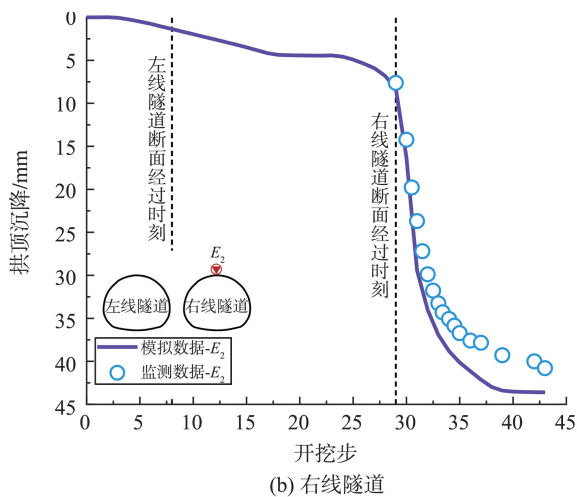


图9 隧道拱顶沉降模拟结果与实测结果对比

Fig.9 Comparison of tunnel vault settlement simulation results and measured results

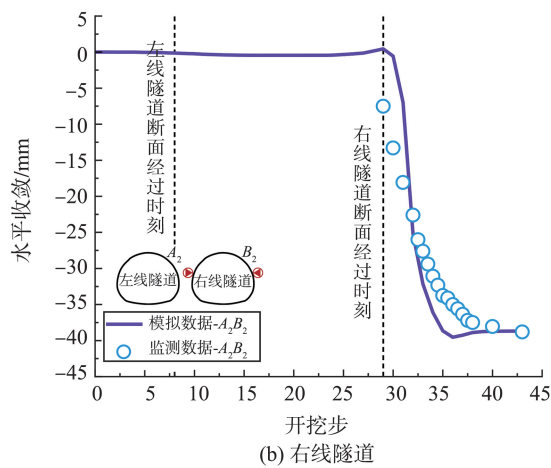
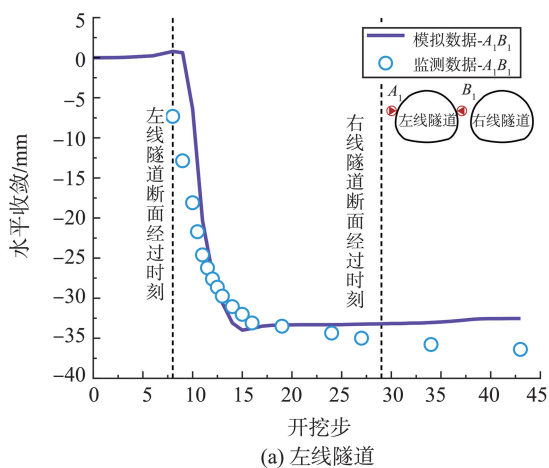


图10 隧道水平收敛模拟结果和实测结果对比

Fig.10 Comparison of tunnel horizontal convergence simulation results and measured results

2.4 围岩变形规律

针对小净距平行近接施工对地层变形的影响,本研究通过数值模拟分析了不同工况下地层塑性区分布规律,分析埋深变化和净距变化对地层塑性区分布规律的影响。9种工况下隧道围岩塑性区的分布如图11所示。

由图11可知,隧道埋深50 m条件下,当净距为10 m时,左线和右线隧道施工完成后,塑性区范围较为广泛,隧道周围土体的塑性变形较大,意味着在此净距下,隧道施工对周边地层产生了显著扰动,致使较大范围地层进入塑性应变状态。随着净距增大至20 m,应变区范围出现了一定程度的缩减,隧道周围土体的塑性变形变小,反映出隧道净距的增加开始对地层塑性变形起到控制作用。当隧道净距进

一步增大到30 m时,应变区范围和土体塑性变形继续减小,且相较于从10 m到20 m的变化,此次减小幅度更为明显,充分表明在隧道埋深为50 m的工况中,随着净距从10 m逐步增加到30 m,地层塑性区范围和隧道土体周围的塑性变形呈现出持续且明显的减小趋势。可以看出,隧道净距较小时,塑性区更容易连通,表明地层在小净距情况下更容易形成连续的变形区域,从而增加了地层失稳的风险。随着隧道净距的增加,塑性区的连通性减弱,地层的稳定性相对提高。

在埋深为50 m时,地层塑性区主要集中在隧道周边,其形状较为对称且应变区范围相对较小,此时塑性应变区的强度较低,等效塑性应变值相对较小,并且隧道间没有明显的塑性应变区连通现象;当埋

深增加至 100 m 时,地层塑性区的范围出现明显扩张。同时,塑性应变区的强度显著提高,等效塑性应变值明显增大,且在隧道间开始出现较弱的塑性应变区连通;当埋深提升到 150 m 时,地层塑性区的范围继续扩大,在隧道之间的区域出现了显著的塑性应变,应变区形状变得更加不规则,且呈现出高应变

区在隧道间连通的趋势。此时塑性应变区的强度达到最大,尤其是隧道之间区域的应变强度增加十分明显,塑性应变区连通性显著增强,形成了较为连续的高应变区。研究表明,当隧道净距为 10 m 时,随着埋深的增加,地层塑性区在范围、强度和连通性方面都呈现出显著增加的趋势。

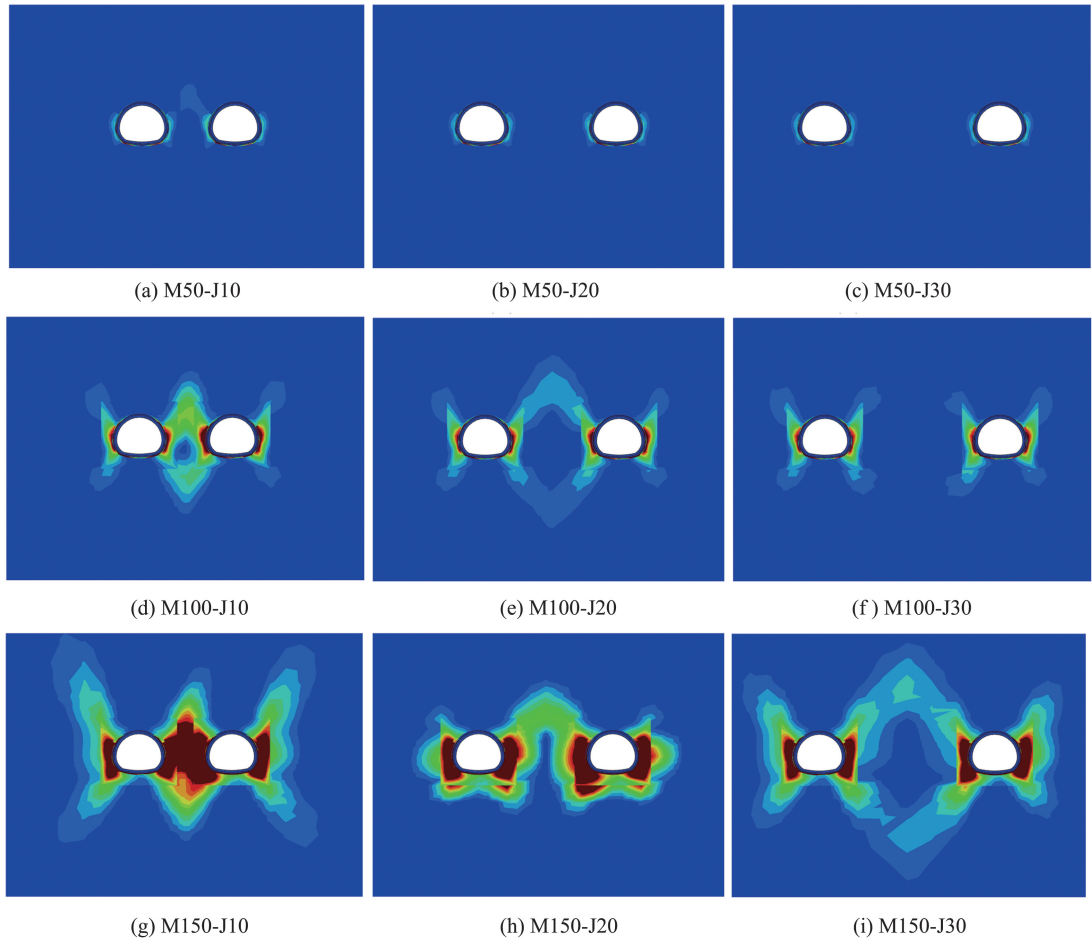


图 11 隧道围岩等效塑性区分布

Fig.11 Distribution of plastic zone of tunnel surrounding rock

由此可见,隧道净距和埋深对地层塑性区分布具有显著影响。隧道埋深越大,净距越小,地层的塑性区范围越大,变形程度越高,地层的失稳风险也越大。因此在隧道的设计与施工过程中,对于净距较小且埋深较大的隧道工况,必须高度关注地层的稳定性问题,充分考虑可能出现的塑性变形情况,并制定相应的有效加固措施,以确保隧道工程的安全和稳定。

2.5 隧道变形规律

为系统研究小净距平行近接施工后行隧道开挖对先行隧道的影响,对 9 组工况中先行隧道拱顶沉降和收敛变形进行了分析。

2.5.1 拱顶竖向位移

隧道净距和埋深对先行隧道竖向位移曲线的

影响分别如图 12、13 所示。由图 12 可知,随着后行隧道的开挖进尺增加,先行隧道的拱顶沉降呈现出先增大后趋于平缓的趋势。以拱顶埋深为 150 m 工况为例,隧道净距为 10 m 的拱顶沉降幅度最大,在后行隧道开挖进尺过程中,先行隧道拱顶沉降值从接近 0 mm 变化到 10 mm 左右;隧道净距为 20 m 的拱顶沉降幅度适中,先行隧道拱顶沉降值从接近 0 mm 变化到 6 mm 左右;隧道净距为 30 m 的拱顶沉降幅度最小,先行隧道拱顶沉降值从接近 0 mm 变化到约 4 mm。拱顶埋深为 100 m 和 50 m 时,净距对先行隧道拱顶沉降的影响与拱顶埋深 150 m 工况相同,但相同净距下隧道拱顶最终沉降量更小。

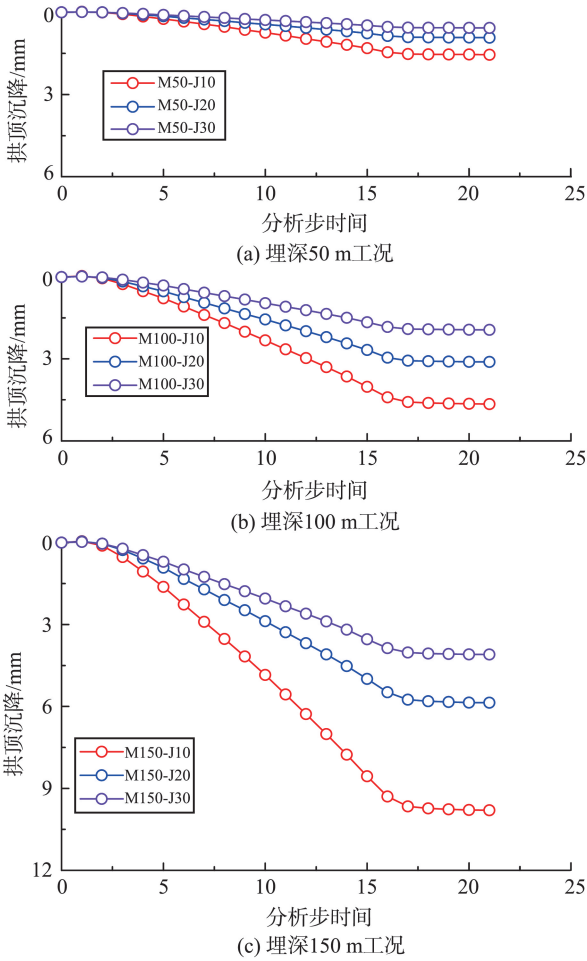


图12 隧道净距对先行隧道拱顶竖向位移曲线的影响
Fig.12 Influence of tunnel spacing on the vertical displacement curve of the first tunnel vault

由图13可知,当净距为10m时,拱顶埋深为150m时,先行隧道的拱顶沉降幅度最大;拱顶埋深为100m时拱顶沉降幅度次之;拱顶埋深为50m时拱顶沉降幅度最小。研究表明,后行隧道开挖对先行隧道的竖向位移有显著影响,隧道净距越小,埋深越大,对先行隧道竖向位移的影响越明显,且埋深对先行隧道竖向位移的影响高于净距产生的影响。

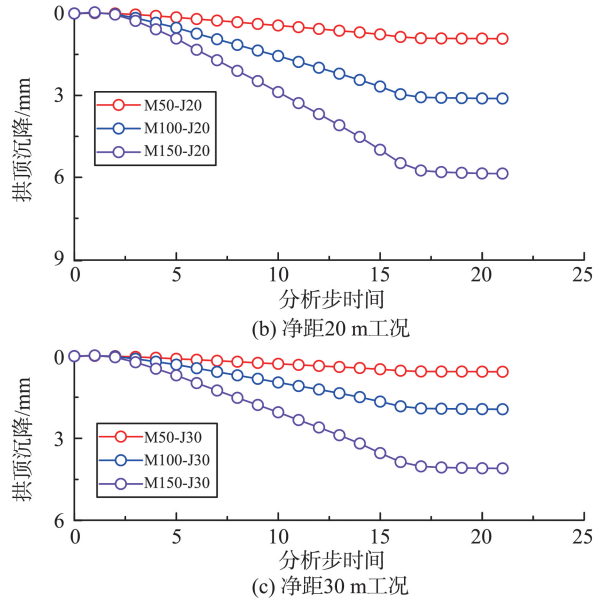
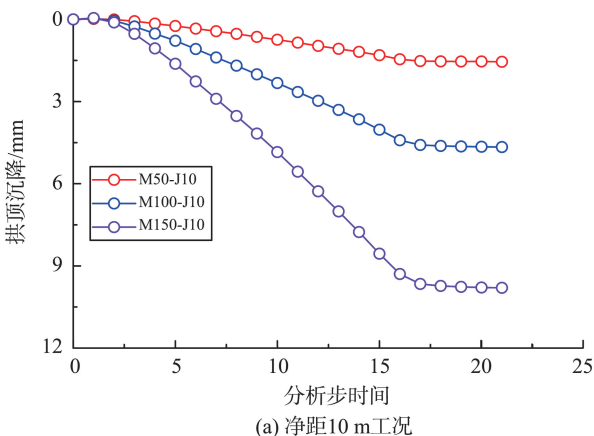


图13 隧道埋深对先行隧道拱顶竖向位移曲线的影响
Fig.13 Influence of tunnel buried depth on the vertical displacement curve of the first tunnel vault

2.5.2 水平收敛变形

隧道净距和埋深对先行隧道水平收敛的影响分别如图14、15所示,图中水平收敛值为负表示隧道断面在水平方向上发生扩张,为正表示隧道断面在水平方向上发生收缩。由图14可知,以埋深50m工况为例,净距为20m和30m时,先行隧道断面收敛值逐渐增大,最后趋于稳定,即先行隧道断面在水平方向上发生扩张;净距为10m条件下,先行隧道断面收敛值呈现“收缩-扩张-收缩-持续扩张”的振荡变化后逐渐趋于稳定,最终整体表现为水平方向扩张,且该振荡特征与施工全过程中先行隧道左右侧壁的受力变化直接相关。左线隧道贯通后、右线隧道开挖前,对两隧道间土体实施的注浆加固提升了地层力学性能,左线隧道左右侧壁受到注浆体施加的侧向挤压应力,两侧受力差导致隧道水平方向收缩;随着右线隧道逐步开挖,周边地层应力释放,左线隧道左右侧壁受力差迅速减小,隧道由收缩转为水平扩张;当右线隧道开挖至与左线监测断面齐平并施作初期支护时,左右侧壁受力差再次增大,隧道由扩张转为收缩;随着该断面支护结构闭合形成完整承载环,结构刚度显著增强,左右侧壁受力差达到最大,隧道水平收缩量达到峰值;右线隧道继续向前推进,左线隧道进入持续扩张阶段,直至右线隧道全部开挖完成。整体来看,隧道净距越小,扩张程度越大;在相同埋深下,随着净距的增加,在后行隧道开挖过程中,先行隧道的水平收敛量减小,隧道在水平方向上的扩张量减小。净距为10m时,先行隧道

的收敛量最大,隧道扩张量最大;净距为 30 m 时,先行隧道的收敛量最小,隧道扩张量最小。这表明在小净距平行近接施工中,增大隧道净距可以有效减小先行隧道的变形。

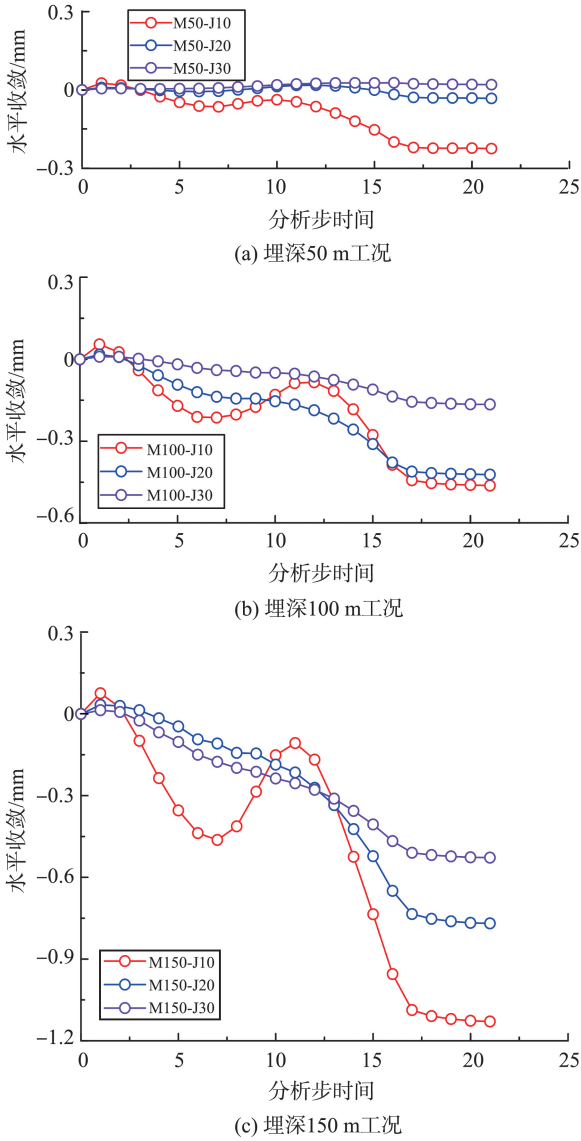


图 14 隧道净距对先行隧道水平收敛的影响
Fig.14 Influence of tunnel spacing on the horizontal convergence of the first

由图 15 可知,在相同净距下,随着埋深增加,在后行隧道开挖进尺过程中,先行隧道的水平收敛量增大。埋深为 150 m 时,先行隧道的收敛量最大,隧道扩张量最大;埋深为 50 m 时,先行隧道的收敛量最小,隧道扩张量最小。表明在施工中,减小埋深可以有效减小先行隧道的变形。研究表明,随着后行隧道的开挖进尺增加,先行隧道的水平收敛呈现出先减小后增大再减小再增大最后趋于平缓的波动现象,但是在不同埋深及不同净距的条件下,波动的幅度不同。

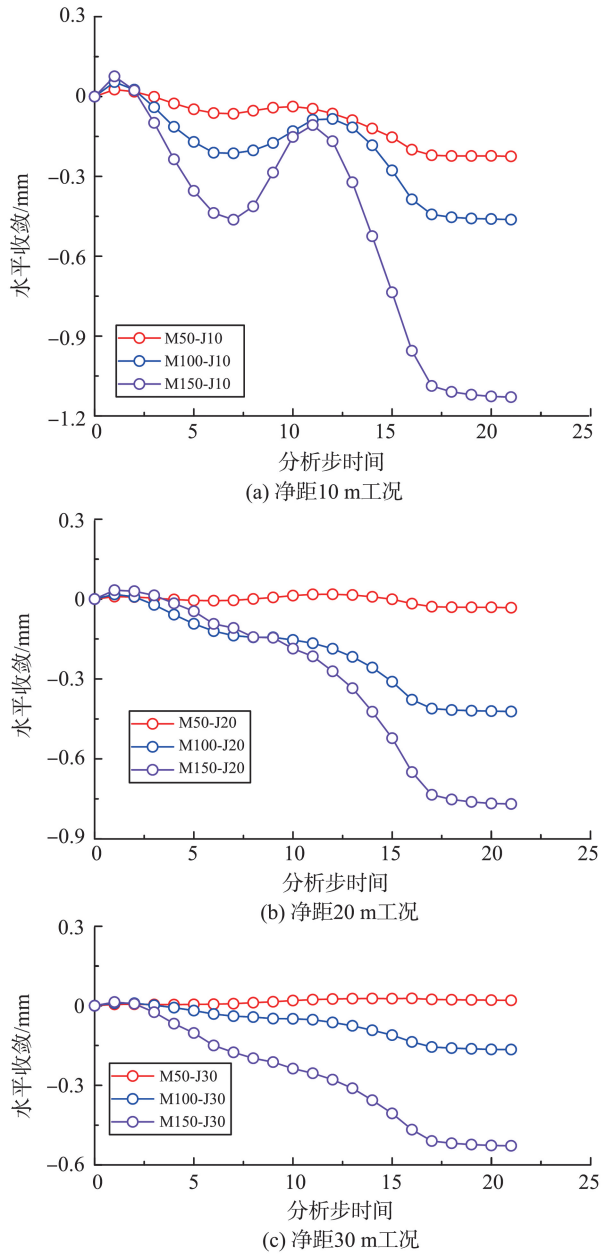


图 15 隧道埋深对先行隧道水平收敛的影响
Fig.15 Influence of tunnel buried depth on the horizontal convergence of the first tunnel

3 小净距开挖扰动下先行隧道韧性评估

在隧道施工前,可根据已给出的多个设计方案进行韧性等级评价,通过与实际工程中设定的韧性等级要求对比,进而筛选出符合要求的设计方案,同时为未达标的设计方案指明需优化的环节(如增强支护强度、调整施工顺序等),以此来预判风险并提供决策依据,提升隧道工程抗风险能力与设计施工的针对性。

本研究基于后行隧道施工下先行隧道竖向位

移和水平收敛变化,计算了两个指标对先行隧道功能影响的敏感性,确定了先行隧道韧性计算指标。然后,以此为基础实现了先行隧道的韧性指数计算,进而实现了各工况下先行隧道韧性等级的评价。

3.1 韧性评价指标选定

后行隧道施工引起的先行隧道竖向位移和水平收敛变化规律如图 12~15 所示,以各工况下拱顶竖向位移和水平收敛的最大值分别作为先行隧道功能指标 $q_1(t_d)$ 和 $q_2(t_d)$,并将其代入公式 (1),分别计算得到后行隧道施工扰动后先行隧道的性能 $Q_1(t_d)$ 和 $Q_2(t_d)$,如表 3 所示。 $Q_1(t_d)$ 表示以竖向位移作为指标时计算的隧道功能最低值, $Q_2(t_d)$ 表示以水平收敛作为指标时计算的隧道功能最低值。

表 3 隧道性能值

Table 3 Tunnel performance value

工况	$Q_1(t_d)$	$Q_2(t_d)$
M50-J10	0.961	0.989
M50-J20	0.977	0.998
M50-J30	0.986	0.999
M100-J10	0.883	0.977
M100-J20	0.922	0.979
M100-J30	0.952	0.992
M150-J10	0.755	0.944
M150-J20	0.853	0.962
M150-J30	0.898	0.974

由表 3 数据可知,拱顶竖向位移所对应的隧道功能最低值 $Q_1(t_d)$ 在 0.755~1 之间;而水平收敛所对应隧道功能最低值 $Q_2(t_d)$ 保持在 0.944~1,拱顶竖向位移所对应的功能值普遍低于水平收敛所对应的功能值,表明后行隧道施工对先行隧道拱顶竖向位移的影响更为显著,以其作为评价指标更能反映先行隧道在后行隧道施工扰动下的功能的变化,因此本研究选用拱顶竖向位移作为隧道韧性的评价指标。

3.2 先行隧道韧性指数计算及韧性等级评估

基于各工况下后行隧道施工时先行隧道的拱顶竖向位移的发展规律,确定了隧道性能演化曲线,如图 16 所示,基于隧道性能能够恢复至初始状态的假定,确定了恢复阶段的性能演化曲线。以此为基础计算了隧道的抗力韧性指数 R_{ESQ_1} 及恢复韧性指数 R_{ECQ_1} ,隧道性能参数及韧性指数如表 4 所示。继而进一步分析了净距与埋深对隧道韧性指数的影响,如图 17 所示。

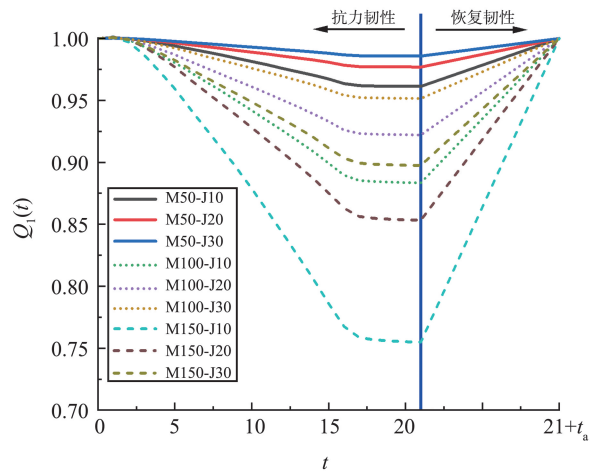


图 16 基于隧道竖向位移评价指标的隧道性能演化曲线
Fig.16 Tunnel performance evolution curve based on tunnel vertical displacement evaluation index

表 4 隧道性能参数及韧性指数

Table 4 Tunnel performance parameters and resilience index

工况	Q_0	Q_{Res}	Q_{Rec}	t_d	t_c	t_r	R_{ESQ_1}	R_{ECQ_1}
M50-J10	1.0	0.961	1.0	21.0	0	t_a	0.978	0.981
M50-J20	1.0	0.977	1.0	21.0	0	t_a	0.986	0.989
M50-J30	1.0	0.986	1.0	21.0	0	t_a	0.991	0.993
M100-J10	1.0	0.883	1.0	21.0	0	t_a	0.937	0.942
M100-J20	1.0	0.922	1.0	21.0	0	t_a	0.957	0.961
M100-J30	1.0	0.952	1.0	21.0	0	t_a	0.973	0.976
M150-J10	1.0	0.755	1.0	21.0	0	t_a	0.869	0.878
M150-J20	1.0	0.853	1.0	21.0	0	t_a	0.922	0.927
M150-J30	1.0	0.898	1.0	21.0	0	t_a	0.944	0.949

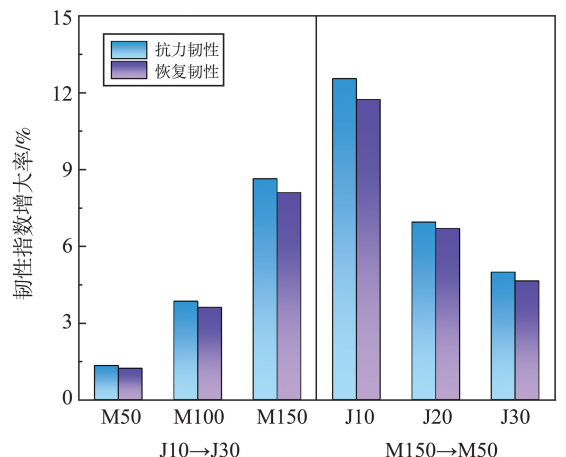


图 17 净距与埋深对隧道韧性指数的影响
Fig.17 Effects of clear distance and burial depth on the resilience index of tunnels

通过表 4 中数据和图 17 可知,在相同埋深下,隧道净距从 10 m 增大到 30 m,先行隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数提高 1.0%~9.0%,由此可见,隧道净距越大,先行隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数越高,抗力韧性和恢复韧性越强;在相同净距下,隧道埋深从 150 m 减小到 50 m,先行隧道的

抗力韧性指数和恢复韧性指数提高 4.0%~12.0%,可以看出,隧道埋深越小,先行隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数越高,抗力韧性和恢复韧性越强,表明在小净距平行近接施工中,增大隧道净距和减小隧道埋深可以有效提升先行隧道的韧性指数,从而提高先行隧道的韧性等级。

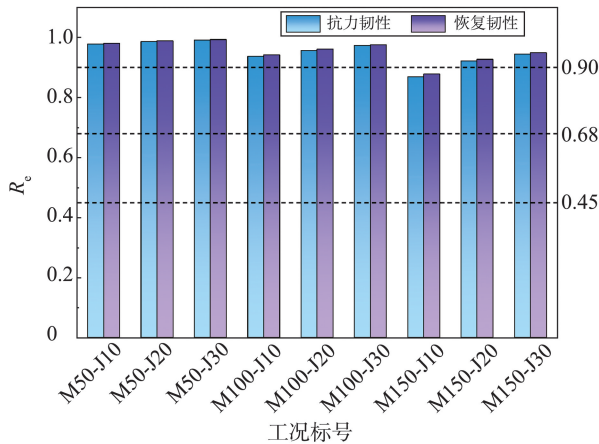


图 18 基于隧道竖向位移评价指标的隧道韧性指数

Fig.18 Tunnel resilience index based on tunnel vertical displacement evaluation index

同时,基于确定的韧性等级划分标准,对 9 各工况中先行隧道的抗力韧性和恢复韧性等级进行的评估,如图 18 所示,9 种工况里仅埋深 150 m,净距 10 m 的工况下,先行隧道的韧性属于中韧性等级;其他工况下,先行隧道的韧性属于高韧性等级。

4 结论

本研究针对新晋高速公路韩口隧道中小净距隧道施工的典型工况,考虑工程中埋深和隧道净距的变化建立数值模型,研究小净距隧道施工下地层和隧道结构的变形规律,并实现后行隧道施工扰动下先行隧道的韧性评价。

(1) 基于隧道结构的拱顶沉降和水平收敛变形,可计算得到两个指标对应的先行隧道功能值。相较于水平收敛,后行隧道施工拱顶沉降对应的先行隧道功能降低更为显著,隧道韧性状态的表征更敏感,更适合作为韧性计算的指标。

(2) 基于确定的韧性计算指标和性能演化规律,实现了各工况下抗力韧性和恢复韧性的指数计算。在相同埋深下,隧道净距从 10 m 增大到 30 m,先行隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数提高 1.0%~9.0%;在相同净距下,隧道埋深从 150 m 减小到 50 m,先行隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数提高 4.0%~12.0%。

(3) 隧道净距越大、埋深越小,隧道的抗力韧性指数和恢复韧性指数越高,9 种工况里仅埋深 150 m、净距 10 m 的工况下,先行隧道的韧性处于中韧性等级,其他工况下先行隧道的韧性处于高韧性等级。

参考文献:

- [1] 程光华,王睿,赵牧华,等. 国内城市地下空间开发利用现状与发展趋势[J]. 地学前缘, 2019, 26(3): 39-47.
CHENG Guanghua, WANG Rui, ZHAO Muhua, et al. Present situation and developmental trend of urban underground space development and utilization in China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 39-47.
- [2] 翟婉明,赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-226.
ZHAI Wanming, ZHAO Chunfa. Frontiers and challenges of sciences and technologies in modern railway engineering[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.
- [3] 张顶立,陈立平,房倩,等. 小净距隧道中央岩墙稳定性分析及其应用[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(1): 1-11.
ZHANG Dingli, CHEN Liping, FANG Qian, et al. Research and application on central rock wall dike stability of small interval tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(1): 1-11.
- [4] LI A, FANG Q, ZHANG D L, et al. Blast vibration of a large-span high-speed railway tunnel based on microseismic monitoring[J]. Smart Structures & Systems, 2018, 21(5): 561-569.
- [5] 杜菊红,黄宏伟,熊玉朝. 小净距隧道净距研究及施工技术应用[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(3): 488-493.
DU Juhong, HUANG Hongwei, XIONG Yuzhao. Investigation on the optimal distance and construction technologies of closely spaced tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(3): 488-493.
- [6] 周静增,王建华,闫自海,等. 软土地层小净距重叠隧道盾构施工相互扰动影响分析及控制措施[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(2): 61-68.
ZHOU Jingzeng, WANG Jianhua, YAN Zihai, et al. Mutual disturbance effects of different construction sequence on overlapping shield tunnels with small net distance in soft soil layer and its control methods [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(2): 61-68.
- [7] 涂智溢,郭洪雨,孙飞,等. 闹市区复杂环境下大直径

- 盾构小净距下穿运营地铁隧道的应对措施及分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(4): 75-84.
- TU Zhiyi, GUO Hongyu, SUN Fei, et al. Countermeasures and analysis of large diameter shield tunneling under operating subway tunnel with small clear distance in downtown complex environment[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(4): 75-84.
- [8] 李旭哲, 李文杰, 毕志刚, 等. 小净距隧道先行洞爆破开挖对后行洞围岩稳定性影响研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(7): 42-49.
- LI Xuzhe, LI Wenjie, BI Zhigang, et al. Effects of blasting excavation of 1st tunnel of small clear distance tunnels on surrounding rock stability of 2nd tunnel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(7): 42-49.
- [9] SONG S G, LI S C, LI L P, et al. Model test study on vibration blasting of large cross-section tunnel with small clearance in horizontal stratified surrounding rock[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 92: 103013.
- [10] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [11] AFSHANI A, AKAGI H, KONISHI S. Close construction effect and lining behavior during tunnel excavation with an elliptical cross-section[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(1): 28-44.
- [12] CHEN S L, LEE S C, GUI M W. Effects of rock pillar width on the excavation behavior of parallel tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(2): 148-154.
- [13] CHEN S L, GUI M W, YANG M C. Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin- and quadruple-tube tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 135-149.
- [14] 裴超, 肖勇, 朱智勇, 等. 复杂应力环境中隧道大变形特征与形变控制[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(2): 89-98.
- PEI Chao, XIAO Yong, ZHU Zhiyong, et al. Large deformation characteristics and deformation control of tunnel in complex stress environment[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(2): 89-98.
- [15] 蒋宇静, 王兴达, 张学朋. 远场地震作用下跨断层深埋隧道结构的动力变形破坏特征[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(3): 1-11.
- JIANG Yujing, WANG Xingda, ZHANG Xuepeng. Dynamic deformation and failure characteristic of deep buried tunnel crossing fault under far-field earthquake loading[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(3): 1-11.
- [16] 蔡遵乐, 梁庆国, 曹生慧, 等. 高地应力软岩隧道的变形规律[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2023, 5(4): 21-32.
- CAI Zunle, LIANG Qingguo, CAO Shenghui, et al. The deformation pattern of soft rock tunnels with high ground stress[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2023, 5(4): 21-32.
- [17] 王圣涛, 陈鹏涛, 刘爱武, 等. 特大跨连续变断面隧道双导洞超前-中柱反向扩挖的施工力学行为[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(4): 1-11.
- WANG Shengtao, CHEN Pengtao, LIU Aiwu, et al. Construction mechanics behavior of extra-large span continuous variable cross-section tunnels using dual guide tunnel advance-central column reverse excavation method[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(4): 1-11.
- [18] GAO F, YE J N, ZHAO C, et al. Soil disturbance induced by shield tunnelling in sensitive clay: in situ test and analyses[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 42: 101106.
- [19] 王飞飞, 江学良, 杨慧, 等. 浅埋偏压小净距隧道加速度响应规律试验与数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(17): 238-247.
- WANG Feifei, JIANG Xueliang, YANG Hui, et al. Tests and numerical simulation for acceleration response laws of a shallow buried small spacing tunnel with asymmetrical pressure[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(17): 238-247.
- [20] 吴梦军, 曹鹏. 卵石层小净距隧道关键参数研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊1): 38-44.
- WU Mengjun, CAO Peng. Study on key parameters of small spacing tunnels in pebble layer[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(Suppl.1): 38-44.
- [21] 刘代国, 左昌群, 唐霞, 等. 地铁盾构近距离后行洞施工对先行洞影响的力学效应[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(4): 1027-1034.
- LIU Daiguo, ZUO Changqun, TANG Xia, et al. Mechanical effects of adjacent metro shield construction of the first hole on the second hole[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(4): 1027-1034.
- [22] 扈萍, 马梁, 李萌, 等. 小净距隧道后行洞开挖对先行洞的变形影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 246-251.
- HU Ping, MA Liang, LI Meng, et al. Deformation effect of subsequent holes excavation on advanced holes in small clear distance tunnels[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, 36(3): 246-

- 251, 272.
- [23] 褚衍玉, 张聪瑞, 任高峰, 等. 后行洞开挖对浅埋偏压小净距隧道影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(5): 919-922.
- CHU Yanyu, ZHANG Congrui, REN Gaofeng, et al. The excavation of following tunnel effect in shallow small spacing tunnels with unsymmetrical load [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2016, 40(5): 919-922.
- [24] DHAR B B, RATAN S, SHARMA D K, et al. Model study of fracture around underground excavations in weak rocks [C]//ISRM International Symposium. Tokyo, Japan, 1981: ISRM-IS-1981-043.
- [25] 路德春, 马超, 杜修力, 等. 城市地下结构抗震韧性研究进展[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(10): 1469-1483.
- LU Dechun, MA Chao, DU Xiuli, et al. Earthquake resilience of urban underground structures; State of the art[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(10): 1469-1483.
- [26] 廖英泽, 王国盛, 李喆, 等. 城市地下基础设施韧性发展现状及策略[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1183-1190.
- LIAO Yingze, WANG Guosheng, LI Zhe, et al. Development status and strategy of urban underground infrastructure resilience [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1183-1190.
- [27] 路德春, 廖英泽, 曾娇, 等. 城市地下空间恢复韧性发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 38-44.
- LU Dechun, LIAO Yingze, ZENG Jiao, et al. Development strategy for recovery resilience of urban underground space[J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(1): 38-44.
- [28] BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [29] HUANG H W, ZHANG D M. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 301-312.
- [30] 林星涛, 陈湘生, 苏栋, 等. 考虑多次扰动影响的盾构隧道结构韧性评估方法及其应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(4): 591-601.
- LIN Xingtao, CHEN Xiangsheng, SU Dong, et al. Evaluation method for resilience of shield tunnel linings considering multiple disturbances and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(4): 591-601.
- [31] 朱旻, 陈湘生, 夏长青, 等. 地面堆载下盾构隧道结构韧性演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(1): 35-44.
- ZHU Min, CHEN Xiangsheng, XIA Changqing, et al. Resilience evolution of shield tunnel structures under ground surcharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(1): 35-44.
- [32] JIANG L, HAO S Y. Resilience evaluation of the existing shield tunnel lining induced by the symmetrical excavation of adjacent foundation pit based on numerical simulations [J]. Symmetry, 2022, 14(2): 229.
- [33] QIU T, SUN X H, CHEN X S, et al. Experimental study and resilience modeling for prefabricated hollow diaphragm walls of full-assembled underground stations under urban multi-disturbance conditions [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 135: 105044.
- [34] HAN K H, ZHANG D M, CHEN X S, et al. A resilience assessment framework for existing underground structures under adjacent construction disturbance [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 141: 105339.
- [35] LIN X T, CHEN X S, SU D, et al. An analytical model to evaluate the resilience of shield tunnel linings considering multistage disturbances and recoveries [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 127: 104581.
- [36] CIMELLARO G P, REINHORN A M, BRUNEAU M. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [37] 郑刚, 程雪松, 周海祚, 等. 岩土与地下工程结构韧性评价与控制[J]. 土木工程学报, 2022, 55(7): 1-38.
- ZHENG Gang, CHENG Xuesong, ZHOU Haizuo, et al. Resilient evaluation and control in geotechnical and underground engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(7): 1-38.

(编辑:张延欢)