

严重扰动作用下盾构隧道纵向结构的韧性评价及应用研究

庞玉玲¹, 秦鹏飞², 管宗甫¹, 詹金武³

(1. 郑州升达经贸管理学院建筑工程学院, 郑州 451191; 2. 黄河科技学院工学部, 郑州 451000;
3. 福建理工大学土木工程学院, 福州 350118)

摘要: 针对盾构隧道结构韧性评价不完善的问题, 以盾构隧道结构的纵向相对差异沉降作为性能指标, 将差异沉降的残余性能与正常性能的比值定义为韧性指标, 提出一种严重扰动作用下盾构隧道结构的新型韧性评价模型。以上海市域线机场联络线新建盾构隧道下穿地铁 15 号线既有隧道的实际工程为背景, 通过分析隧道变形随掘进距离和施工进度的变化规律, 获得破坏阶段和恢复阶段内结构性能衰减特征, 最后应用该模型对既有地铁隧道结构的韧性进行评价。结果表明: 在新建隧道下穿施工后的前 38 d 内, 既有隧道产生 32.3% 的性能损失; 在注浆加固完成后, 既有隧道的性能由 0.677 提升至 0.868, 其恢复量约占下穿期间性能损失的 59.1%。隧道结构韧性指标的计算结果为 0.764, 说明案例中既有地铁隧道具备较高的韧性水平; 此外, 通过讨论隧道结构纵向沉降的其他性能指标, 验证所提性能指标的合理性与适用性。

关键词: 城市轨道交通; 盾构隧道; 严重扰动; 韧性评价; 纵向沉降; 性能指标

中图分类号: U455.7

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)01-0106-12

Resilience Evaluation and Application of Longitudinal Structure of Shield Tunnels Considering Severe Disturbances

PANG Yuling¹, QIN Pengfei², GUAN Zongfu¹, ZHAN Jinwu³

(1. School of Architecture and Engineering, Zhengzhou Shengda University, Zhengzhou 451191;
2. Department of Engineering, Huanghe University of Science and Technology, Zhengzhou 451000;
3. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118)

Abstract: In light of the rapid expansion of underground rail transit systems and the growing requirements for tunnel operation and maintenance, the longitudinal structural resilience of shield tunnels has emerged as a critical research topic in the field of engineering. In this paper, the longitudinal differential settlement is employed as a performance index, and the ratio of residual performance to normal performance of differential settlements is defined as the resilience metric Re , thus a new model using longitudinal relative differential settlement as the index of tunnel structural resilience performance is proposed. Based on a case study in which a newly constructed shield tunnel of Shanghai suburban railway airport link line undercrosses the existing Metro Line 15 tunnel, the variations in tunnel deformation with respect to tunneling distance and construction schedule are analyzed. Then, the degradation characteristics of structural performance during both the disturbance stage and the recovery stage are effectively captured. Finally, the proposed model is applied to evaluate the structural resilience of existing metro tunnels. The results show that 32.3% of the

收稿日期: 2025-04-10 修回日期: 2025-09-14

第一作者: 庞玉玲, 女, 硕士, 讲师, 研究方向为地下空间及隧道工程, pyl200200@163.com

基金项目: 河南省自然科学基金(2025112328); 福建省自然科学基金(2022J05185); 河南省科技攻关计划项目(232102320116)

引用格式: 庞玉玲, 秦鹏飞, 管宗甫, 等. 严重扰动作用下盾构隧道纵向结构的韧性评价及应用研究[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(1): 106–117.

PANG Yuling, QIN Pengfei, GUAN Zongfu, et al. Resilience evaluation and application of longitudinal structure of shield tunnels considering severe disturbances[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(1): 106–117.

performance loss is attributed to the new tunnel undercrossing during the first 38 days. After the completion of the grouting reinforcement, the tunnel performance is improved from 0.677 to 0.868; this improvement accounts for approximately 59.1% of the performance loss during the crossing period. Eventually, the resilience metric Re is calculated as 0.764, indicating a high level of resilience for the existing metro tunnel in this case. Moreover, other performance indices related to the longitudinal settlement of the tunnel are compared to validate the rationality and applicability of the proposed performance index.

Keywords: urban rail transit; shield tunnel; severe disturbance; resilience evaluation; longitudinal settlement; performance indices; case study

随着我国城市化建设的推进,地面交通设施已经无法满足人们日益增长的出行需求,城市地下轨道交通成为解决该问题的一个最优选项。据统计,截至2024年底,我国共有54个城市开通地铁线路,总里程超过10 000 km^[1]。这些已建成的地铁线路在长期运营过程中,不可避免地会受到周边环境扰动的影响,尤其是在盾构穿越^[2]、基坑开挖^[3]或桩基施工^[4]等严重扰动的情况下,会对既有地铁隧道主体结构的安全性和可靠性带来巨大隐患。地铁隧道通常采用盾构法进行施工,盾构隧道的主体结构由一系列拼装式管片组成,由于管片之间环缝和纵缝的存在,使得该结构在环向表现为刚性;在纵向则表现为柔性。于是当盾构隧道遭遇严重扰动时,管片极易发生纵向变形从而产生错台开裂、接缝渗漏和螺栓失效等工程病害,导致隧道主体结构性能严重衰退,威胁着地铁线路的运营安全。因此,为了保证地铁线路在运营期内的安全,必须对盾构隧道的结构性能进行有效评估,并结合评估结果给出可行的修复方案。

地铁线路的运营安全与管片的性能密切相关,许多学者通常采用层次分析法^[5]和模糊综合评价^[6]等传统方法评估管片的性能。然而,传统的评价方法往往专注于特定时间的事件或场景,难以实现全过程的评价。近年来,韧性理论的提出进一步丰富了性能评价的维度。HOLLING^[7]首次在生态系统中引入了韧性的概念,将韧性定义为:受外部扰动或冲击后系统恢复自身性能的能力。这意味着一旦扰动发生时,韧性系统能够充分吸收扰动并恢复至预期的性能水平。可以看出,韧性能够反映系统在全寿命周期内性能的变化,而韧性评价则可以作为评估全过程内系统性能的有效手段。

现如今,韧性评价已在各类工程领域中得到了充分应用,其范围涵盖水资源系统、交通系统和基础设施系统等多个领域。对于严重扰动作用下盾构隧道管片性能的韧性评价,众多学者开展了大量研究。HUANG等^[8]采用隧道结构的水平收敛特征作为盾构隧道的性能指标,提出了盾构隧道结构的韧性评价的精细化模

型,并将其应用于工程案例中评估了盾构隧道在扰动至加固的周期内结构韧性演化规律。Jiang等^[9]以盾构隧道管片环的最大沉降量作为指标,通过数值模拟的手段评估了深基坑开挖扰动作用下的隧道结构的韧性。Lin等^[10]采用盾构隧道的最大沉降与水平收敛作为其性能指标,评估了在周边地下室开挖的扰动作用下隧道结构的韧性。类似地,林星涛等^[11]提出了多次扰动下盾构隧道结构韧性评价模型,并在新建平行隧道下穿既有隧道的工程中进行了应用。朱旻等^[12]建立管片的精细化三维有限元分析模型,研究了地面堆卸载作用下不同埋深盾构隧道结构响应特征和韧性演化规律。

综上所述,目前关于盾构隧道结构的韧性分析研究仍不完善,大多数研究成果主要集中于隧道结构横截面的变形。虽然已有少量文献考虑了管片的最大沉降,但是仅针对单环管片作为其具体性能指标,依然忽略了相邻管片环之间的沿轴向差异沉降问题,尤其是对于盾构隧道纵向变形特性的内容却鲜有相关研究报道。因此,本文基于Huang等^[8]的韧性评价的精细化模型,充分考虑严重扰动作用下管片的性能衰减以及性能恢复的效果,提出一种聚焦于盾构隧道结构纵向差异沉降的性能指标,建立严重扰动作用下盾构隧道纵向结构的韧性评价模型,最后将该模型应用于实际工程案例中,以验证所提性能指标在盾构隧道纵向结构韧性评价中的适用性。

1 盾构隧道结构的韧性特征及评价模型

1.1 韧性特征

韧性评价包括:系统识别、韧性指标定义和韧性定量分析。其中,系统识别作为韧性定量分析的基础需要综合考虑多种因素;根据盾构隧道结构的性能随时间的变化曲线定义韧性指标;对结构性能与时间的曲线函数进行积分以实现韧性定量分析。此外,根据该曲线还可以获得系统中韧性的各种特征,包括:易损性、鲁棒性、恢复性和冗余性。易损性表示结构在受冲击或扰动后所产生的破坏程度;鲁棒性表示结构

保证自身不被破坏的抗冲击或扰动的能力；恢复性表示结构受破坏后还能够恢复至正常性能水平的能力；冗余性则表示结构受冲击或扰动后仍有承载能力并确保其稳定的能力。因此，本文主要针对盾构隧道结构的易损性、鲁棒性和恢复性进行韧性评价研究。

1.2 韧性评价的模型

管片作为盾构隧道的主体结构，能够有效抵抗地层变形及施工荷载，Huang 等^[8]认为盾构隧道在受到严重扰动后管片的性能衰减曲线 $Q(t)$ 如图 1 所示。该曲线主要包括 3 个阶段：管片受到严重扰动之前的正常阶段；从管片受到严重扰动，直至开始恢复的破坏阶段(由时间 t_i 到时间 t_r)；对管片修复后，达到其正常性能水平的恢复阶段。其中，该性能衰减曲线 $Q(t)$ 在破坏阶段所经历的时间为 ΔT 。在此破坏持续时间(ΔT)内，当盾构隧道受到严重扰动时($t=t_i$)，管片性能开始下降；在达到一个临界时间点($t=t_r$)时管片发生破坏；随后管片的性能又会经历一段决策期(由时间 t_r 到时间 t_s)，即确定紧急救援和设计恢复措施的决策过程；最后采取了相关修复措施以后，管片的性能将恢复至一个可接受的性能水平(由时间 t_s 到时间 t_r)。

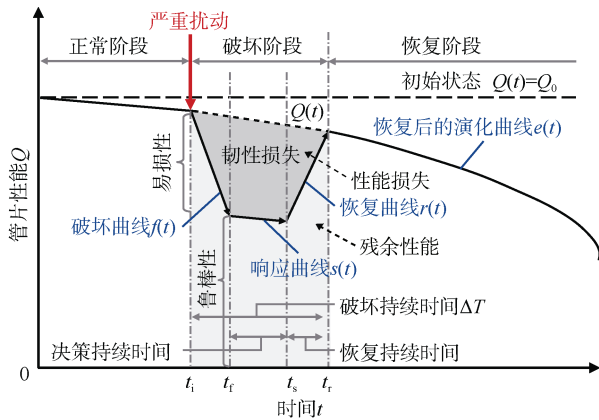


图 1 严重扰动作用下盾构隧道的韧性评价模型

Figure 1 Resilience evaluation framework for shield tunnels under severe disturbance

由图 1 可知，管片在正常阶段的性能衰减主要是由环境的侵蚀所引起，其性能衰减的幅度较为缓慢。当盾构隧道在运营期内遭遇严重扰动时，管片性能的衰减开始逐渐加剧，管片在破坏阶段的性能衰减曲线主要由 3 种过渡曲线组成，包括：破坏曲线 $f(t)$ 、响应曲线 $s(t)$ 和恢复曲线 $r(t)$ 。这 3 种过渡曲线分别表示在扰动期、决策期和恢复期内管片性能随时间的变化情况，这些曲线会根据不同的隧道设计和修复措施而产生变化。此外，采用不同的措施对管片进行修复后，

对其性能恢复的影响程度也会有所不同，于是将恢复阶段内管片性能衰减曲线定义为恢复后的演化曲线 $e(t)$ 。因此，结合上述这些曲线即可获得盾构隧道结构韧性的一系列特征。

如图 1 所示，当 $t=0$ 时，管片的初始性能为 Q_0 ，将其称为盾构隧道结构的初始性能；当 $t=t_r$ 时，管片的性能为 $Q(t_r)$ ，将其称为盾构隧道结构的正常性能。同理当 $t=t_r$ 时，结合破坏曲线 $f(t)$ 可定义盾构隧道结构的鲁棒性为 $f(t_r)$ ，该指标表示在严重扰动作用下管片仍能保持一定性能水平的能力。于是将管片的性能损失定义为 V_n ，其中 $V_n=Q(t_r)-f(t_r)$ ，该指标表示盾构隧道结构在严重扰动下的易损性。此外，在整个破坏持续时间 ΔT 内，从时间 t_s 到时间 t_r 的恢复持续时间相对最短，这说明了盾构隧道的恢复过程具有快速性。由此可以看出，盾构隧道的主体结构具有高鲁棒性、低易损性和快速恢复到正常性能水平的能力至关重要。

根据相关研究结论^[13]，将严重扰动条件下盾构隧道结构的韧性定义为 Re ，如式(1)所示，该模型可用于定量评估管片的韧性。

$$Re = \frac{F(t_f - t_i) + S(t_s - t_r) + R(t_r - t_s)}{t_r - t_i} \quad (1)$$

式中， F 、 S 和 R 为权重系数。

本质上 F 、 S 和 R 是管片性能衰减曲线在破坏持续时间(ΔT)阶段中破坏曲线、响应曲线和恢复曲线分别与坐标横轴所形成的面积，其表达式如式(2)所示，权重系数量化了严重扰动条件下各阶段对管片韧性的影响和持续时间。

$$\begin{cases} F = \frac{\int_{t_i}^{t_r} f(t)dt}{\int_{t_i}^{t_r} Q(t)dt} \\ S = \frac{\int_{t_r}^{t_s} s(t)dt}{\int_{t_r}^{t_s} Q(t)dt} \\ R = \frac{\int_{t_s}^{t_r} r(t)dt}{\int_{t_s}^{t_r} Q(t)dt} \end{cases} \quad (2)$$

此外，图 1 中阴影区域的总面积表示管片的正常性能，而图 1 中深色阴影区域的面积和浅色阴影区域的面积分别表示管片的性能损失和残余性能。于是结合式(1)可以发现，管片的残余性能与正常性能的比值，即浅色阴影区域面积与整个阴影区域面积的比值，就是管片韧性的几何意义。若 Re 越大则意味着盾构隧道结构在承受扰动以及从扰动中恢复的能力更强，而

且不会产生显著的性能损失。

1.3 纵向沉降的性能指标

如图2所示, $\omega_{\max}$ 为管片的最大沉降, ω_{diff} 为管片的相对差异沉降, 在盾构隧道的日常监测和维护工作中, 设计及施工人员会优先分析差异沉降, 而不是评估最大沉降。特别是当盾构隧道发生均匀沉降时, 相邻管片环之间的差异沉降可以忽略不计, 这并不会对盾构隧道的安全造成危害。在实际工程中, 盾构隧道的纵向相对差异沉降应重点关注, 除了强调相邻管片环之间的差异沉降的监测以外, 还需要考虑整个监测区间内差异沉降的程度。

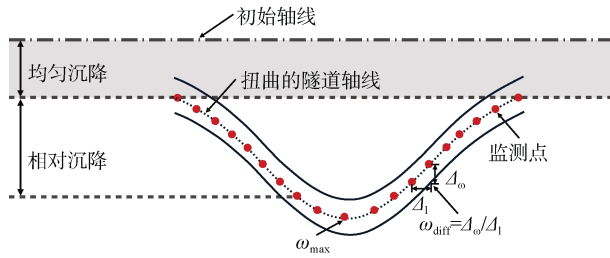


图2 盾构隧道纵向变形性能的常用参数

Figure 2 Critical parameters for longitudinal deformation performance of shield tunnels

为了对盾构隧道结构的韧性进行定量评价, 本文提出一个盾构隧道纵向相对差异沉降的性能指标 S_{re} , 并将该性能指标定义为相对差异沉降的面积 S_{ω} 与均匀沉降的面积 S_u 之比, 该指标的几何意义如图3所示。图中红色虚线上部浅色阴影区域为纵向沉降的变形区域面积 $S_{u,s}$, 红色虚线下部深色阴影区域为纵向隆起的变形区域面积 $S_{u,h}$, 而蓝色斜线阴影区域的面积即为相对差异沉降的面积 S_{ω} , 这3个参数的计算如式(3)所示。其中管片的均匀沉降 ω_i 为最大沉降 $\omega_{\max,s}$ 和最大

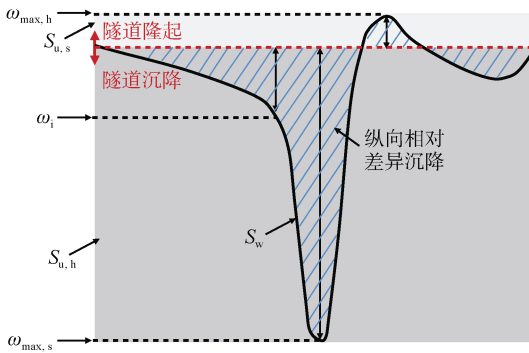


图3 纵向相对差异沉降的性能指标定义

Figure 3 Definition of performance indices for longitudinal relative differential settlement

隆起 $\omega_{\max,h}$ 之和, 均匀沉降的面积即为 $S_{u,s}$ 与 $S_{u,h}$ 之和。相对差异沉降的性能指标 S_{re} 可以通过式(4)计算, 然后将每个时刻的相对差异沉降性能指标通过式(5)进行标准化处理, 由此即可定义相对差异沉降的性能衰减曲线 $Q(t)$ 。

$$\begin{cases} S_{\omega} = \int_0^L \omega_i dx \\ S_{u,s} = \int_0^L \omega_{\max,s} dx \\ S_{u,h} = \int_0^L \omega_{\max,h} dx \end{cases} \quad (3)$$

$$S_{\text{re}} = \frac{S_{\omega}}{S_{u,s} + S_{u,h}} = \frac{\int_0^L \omega_i dx}{(\omega_{\max,s} + \omega_{\max,h})L} \quad (4)$$

$$Q(t) = \frac{S_{\text{re}}(t)}{S_{\text{re}0}} \quad (5)$$

式中, ω_i 为第 i 环管片的实测沉降, mm; L 为盾构隧道中监测区间的长度, m; $S_{\text{re}0}$ 为盾构隧道受到严重扰动前相对差异沉降的初始面积比。

根据前文所提到的韧性评价模型发现, 在管片性能衰减曲线 $Q(t)$ 及其过渡曲线 $f(t)$ 、 $s(t)$ 、 $r(t)$ 和 $e(t)$ 均为已知的情况下, 可对盾构隧道的纵向结构韧性进行定量评价。

2 工程案例

2.1 工程概况

上海地铁15号线既有隧道在运行10个月后, 又有1条新的上海市域线机场联络线从其下方穿越, 该新建隧道主要采用大直径泥水平衡盾构机进行掘进施工, 其盾构机外径为14 m, 既有地铁隧道与新建盾构隧道之间的最小垂直距离为7.5 m, 而既有地铁隧道的外径和覆土厚度分别为6.6和11.35 m, 既有隧道与新建隧道之间的位置关系如图4所示。

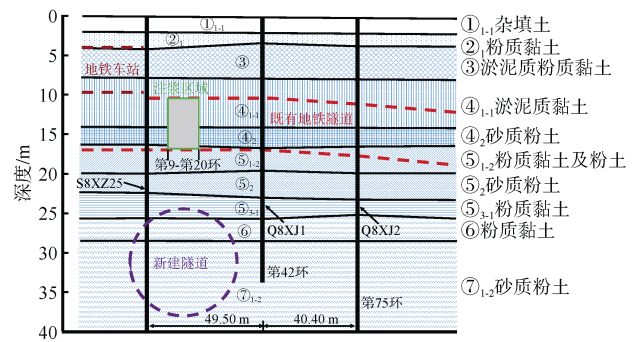


图4 新建盾构隧道下穿既有地铁隧道的地质剖面

Figure 4 Geological profile of the new shield tunnel undercrossing the existing metro tunnel

由图 4 可以看出,既有地铁隧道主要位于淤泥质黏土(④₁₋₁)、砂质粉土(④₂)和粉质黏土及粉土(⑤₁₋₂)等地层中,而新建盾构隧道则穿越了粉质黏土(⑤₃₋₁)、粉质黏土(⑥₁₋₂)和砂质粉土(⑦₁₋₂)等地层。本工程的地质条件为典型的软黏土地层,这类地层具有含水率高和抗剪强度低的特点,对扰动非常敏感。

既有地铁隧道的主体结构如图 5 所示,其管片环外径为 6.6 m,管片环壁厚为 0.35 m,管片环的纵向长度为 1.2 m。整环管片由 3 个标准块、2 个邻接块和 1 个封顶块组成,环间采用 6 个径向接头连接,这些环间接头沿纵向保持连续并在一条直线上对齐;每环管片由 M24 螺栓、弹性橡胶密封垫片和橡胶密封圈组成的 17 个环向接头连接。

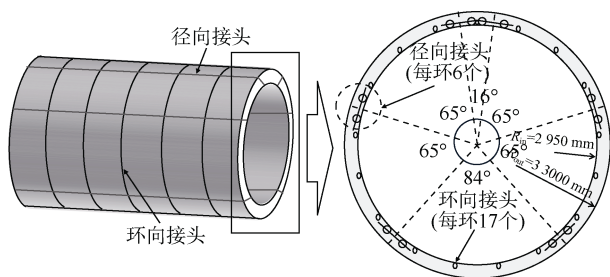


图5 既有地铁隧道的管片环结构

Figure 5 Segment ring structure of existing metro tunnels

2.2 新建隧道施工方案

在既有地铁隧道下方进行盾构掘进施工时, 通常需要及时调整各种掘进参数以保证周边环境的安全和稳定。盾构机在掘进过程中的施工进度和推进距离如图 6 所示, 盾构机的掘进参数和刀盘与既有地铁隧道之间的距离关系如图 7 所示。

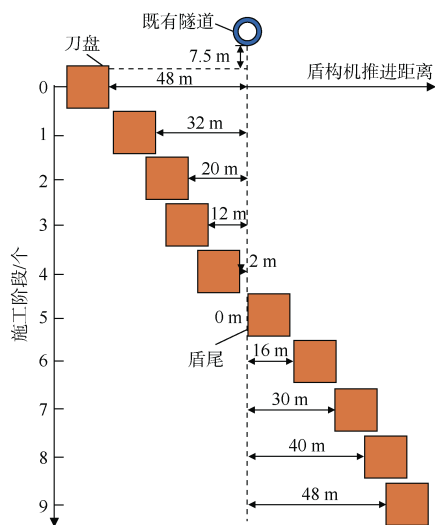
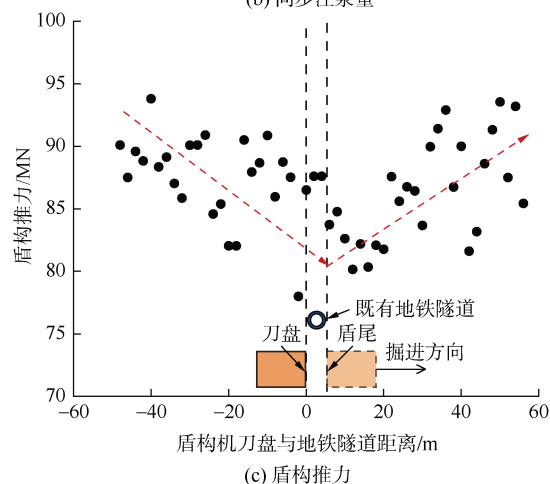
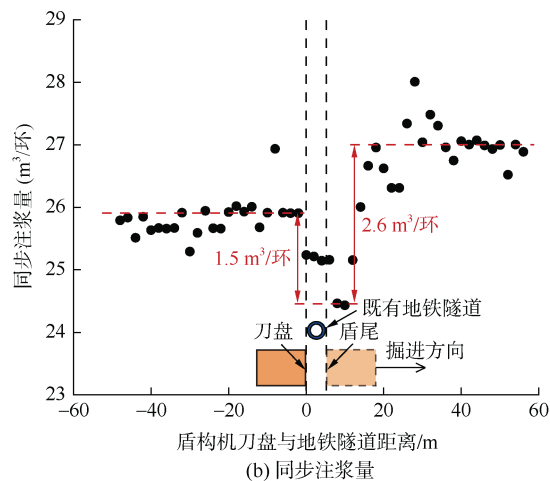
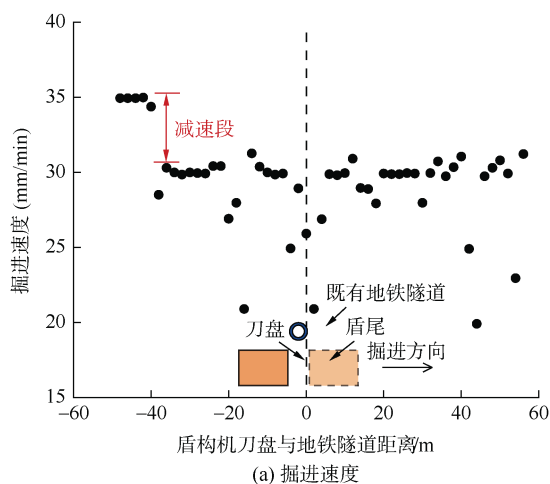


图 6 新建盾构隧道的施工进度计划

Figure 6 Construction schedule for new shield tunnel projects

由图 7(a)可知,当盾构机的刀盘距离既有地铁隧道仅有 40 m 时,其掘进速度由 35 mm/min 降至 30 mm/min,虽然在该阶段刀盘可以支撑开挖面附近的土体以维持稳定,同时盾构机在此时减速还能够进一步减少对周边环境的扰动,并且盾构机一直保持 30 mm/min 的速度直到穿越既有地铁隧道 60 m 后。由图 7(b)可知,在盾构机下穿既有地铁隧道之前,同步注浆量从 25.9 m³/环下



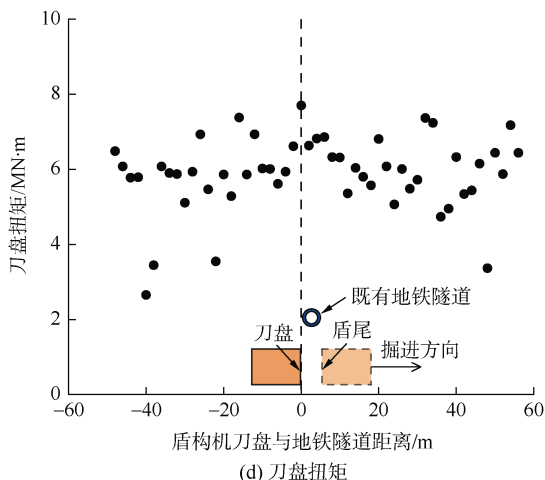


图7 新建盾构隧道下穿既有地铁隧道的掘进参数

Figure 7 Tunneling parameters during the new shield tunnel undercrossing the existing metro tunnels

降至 $24.4 \text{ m}^3/\text{环}$, 减少了约 $1.5 \text{ m}^3/\text{环}$; 当盾构机的盾尾驶离既有地铁隧道之后, 同步注浆量又迅速增加到 $27 \text{ m}^3/\text{环}$, 其同步注浆量相较于盾构机穿越既有地铁隧道前还增加了 $1.1 \text{ m}^3/\text{环}$ 。这可能是因为盾构机的盾尾在穿越既有地铁隧道的过程中, 同步注浆施工所产生的注浆压力加剧对既有地铁隧道的扰动; 当盾尾完全穿过既有隧道后, 又需要大量同步注浆进一步增强管片周围土体的力学性能, 进而极大地减少施工后沉降的风险。

在新建盾构隧道下穿既有地铁隧道施工完毕的一个月以后, 整个监测区间中第9环到第20环的区间内发生了严重变形, 其最大累积沉降量达到 14.8 mm , 而且其变形率超过了上海市工程建设规范^[14]所规定的临界值(0.02 mm/d)要求。因此, 根据 GB50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》^[15]要求, 该下穿施工对既有地铁隧道属于严重扰动, 亟须对既有地铁隧道变形段(第9环到第20环)进行地层注浆加固措施, 本次地层注浆加固施工的顺序为左右两侧每2环对称进行, 其注浆加固的施工过程如图8所示。

由图8可知, 在1个管片环内有2个对称分布的注浆孔, 每个注浆孔距离隧道轴线处约 1461 mm , 每环管片的注浆深度在仰拱以下 0.2 m 到 2.4 m 的范围内。地层注浆加固施工应在地铁停运期间进行, 主要采用水泥-水玻璃混合浆液进行注浆施工, 水泥浆的水灰比在 0.7 到 1.0 之间, 水泥浆和水玻璃的体积比为 $3:1$ 。在注浆加固过程中, 每个注浆孔的注浆过程宜分为几个独立的阶段进行, 每个阶段的注浆高度约为 220 mm , 注浆压力应控制在 0.4 MPa 左右, 每次注浆

的周期不应小于 2 d 以避免浆液凝固。每环管片的注浆量约为 1680 L , 还应保证每环管片的注浆量均匀分布, 注浆过程应持续进行, 直至隧道的沉降能够控制在可接受的水平。既有地铁隧道注浆加固的施工周期约为 30 d , 从新建盾构隧道施工完毕后的 38 d 开始至 68 d 结束。

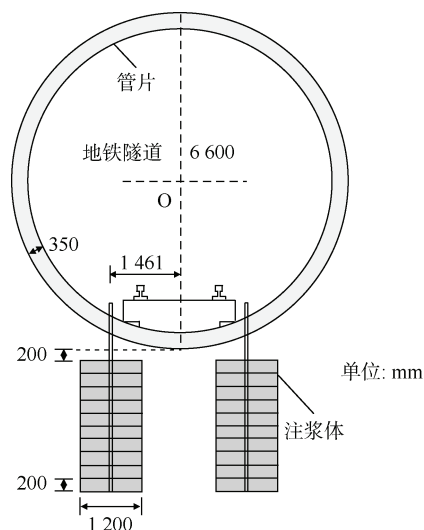


图8 每环管片在注浆加固时的施工参数

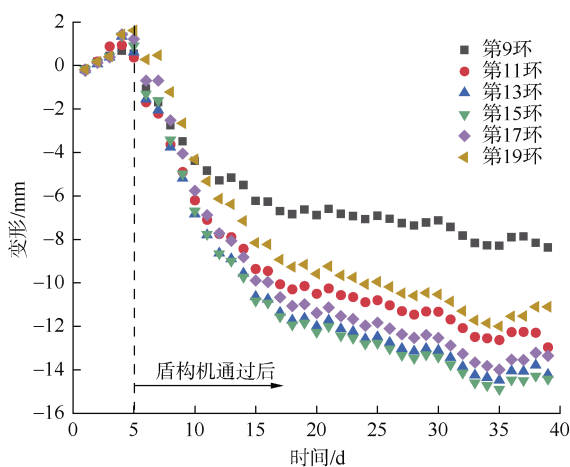
Figure 8 Construction parameters for grouting reinforcement of each segment ring

2.3 既有地铁隧道的变形

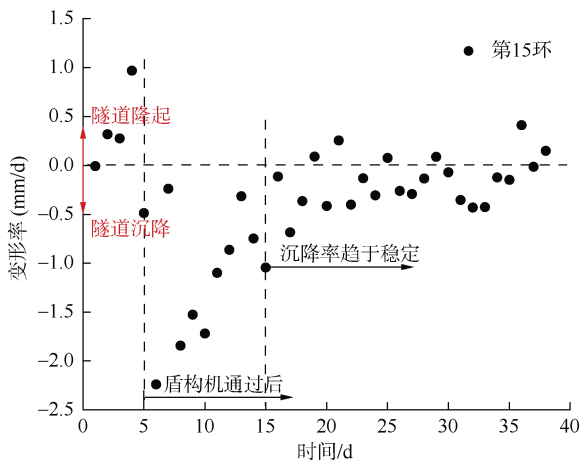
既有地铁隧道的沉降采用电子水准仪进行监测, 每2环管片设置1个测点, 尤其是第9环至第20环的变形监测结果应重点分析。在下穿施工前后对应的时间段内所得的既有地铁隧道的变形和变形率的监测结果如图9所示, 其中图9(a)分别选取了第9、11、13、15、17和19环管片的变形数据进行分析; 图9(b)选取了第15环管片的变形率进行分析。在既有地铁隧道中, 第9、11、13、15、17和19环管片的变形与盾构机和既有隧道之间距离的关系如图10所示。当盾构机完全穿过既有地铁隧道后, 由于现场施工人员的工作失误, 未能及时获取第19环管片的变形监测数据, 所以图10(b)仅给出了第9、11、13、15和17环管片的变形监测结果。

由图9(a)可以看出, 在下穿施工前既有地铁隧道逐渐向上移动。从 5 d 处起, 盾构机掘进至既有地铁隧道正下方, 此时既有地铁隧道的变形表现为隆起, 其最大隆起变形约为 1.8 mm ; 随后在盾构机完全驶离后, 既有地铁隧道的变形出现了明显且迅速的下降, 此时表现为沉降逐渐增大; 这种情况约持续 10 d 后, 又逐

渐转变为缓慢的沉降并趋于稳定。由图9(b)可知,在盾构机刚刚穿过既有地铁隧道后的前10 d内,此时既有隧道的变形最为剧烈,在此期间第15环管片的最大变形率约为 -2.2 mm/d ;而且在下穿施工前,随着盾构机的逐渐接近,管片的变形率逐渐增加,最大隆起变形率约为 1.0 mm/d ;在15 d后,其变形率在 $[-0.7\text{ mm/d}, 0.4\text{ mm/d}]$ 的范围内趋于稳定。



(a) 变形随盾构掘进时间的变化

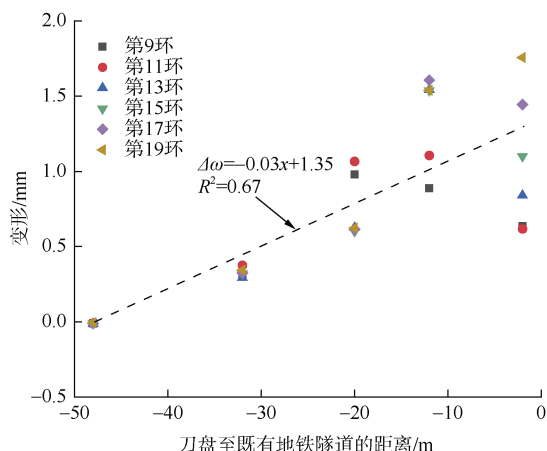


(b) 变形率随盾构掘进时间的变化

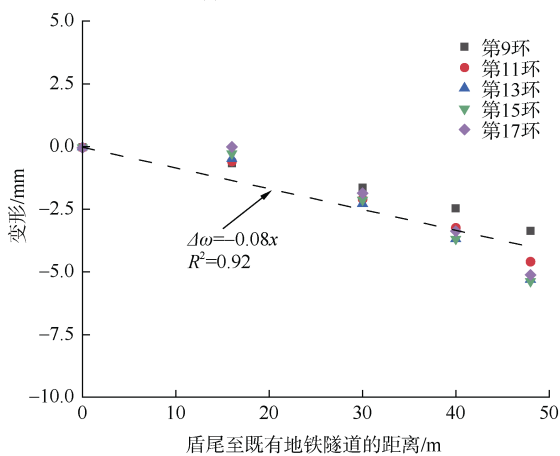
图9 既有地铁隧道在下穿施工期间的变形和变形率
Figure 9 Deformation and deformation rate of existing metro tunnels during undercrossing tunneling

由图10(a)可知,随着刀盘与既有隧道之间距离的减少,既有地铁隧道的变形呈线性向上隆起的趋势。该线性关系可用方程 $\Delta\omega=-0.03x+1.35$ 拟合,其决定系数 R^2 为0.67,这说明既有地铁隧道的每环管片隆起变形存在不确定性。由图10(b)可知,盾构尾穿过隧道后的沉降变化,随着盾尾与既有隧道之间距离的增加,既有地铁隧道的变形呈线性向下沉降的趋势,该线性关系的拟合方程为 $\Delta\omega=-0.08x$,其决定系数 R^2 为0.92。

可以看出这部分监测数据的拟合程度较高,说明第19环管片变形监测数据缺失对既有地铁隧道变形幅度判断的影响较小;同时这也意味着盾尾每远离既有地铁隧道1 m,则既有隧道的沉降将增加0.08 mm。由此可见,新建盾构隧道下穿既有地铁隧道所引起的沉降变形的幅度远大于隆起变形的幅度。



(a) 刀盘逐渐靠近既有隧道

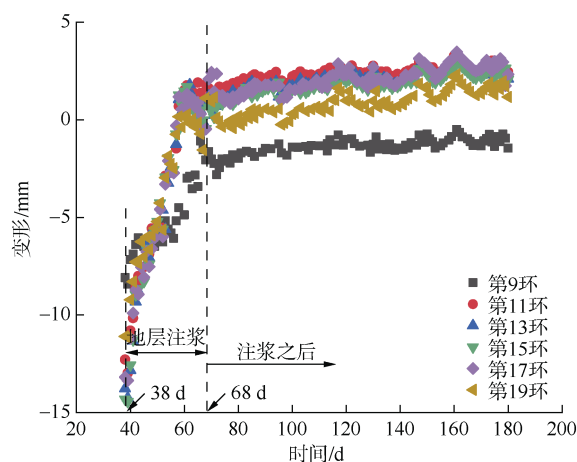


(b) 盾尾逐渐远离既有隧道

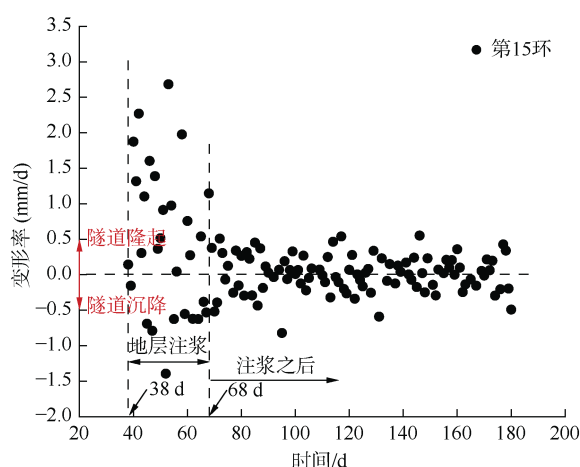
图10 既有地铁隧道的变形与盾构机和隧道的距离的关系
Figure 10 Relationship between the deformation of the existing metro tunnels and the distance between the shield machine and the tunnel

在对既有地铁隧道附近地层进行注浆加固的施工过程中,既有地铁隧道的沉降逐渐减小。既有地铁隧道进行注浆加固期间和注浆加固以后的变形及变形率如图11所示,其中图11(a)为第9、11、13、15、17和19环管片的变形;图11(b)为第15环管片的变形率。由图11(a)可知,在地层注浆加固后,一部分管片环的沉降超过了0 mm,表明既有地铁隧道的变形模式由向下沉降转变为向上隆起。由图11(b)可知,在地层注浆加固期间,第15环管片的最大变形率达到了 2.8 mm/d ,

这表明第 15 环管片的沉降在那一天减少了约 2.8 mm；在地层注浆加固结束后，管片的变形率保持稳定，说明地层注浆加固施工对减少既有地铁隧道的沉降是有效的，并且注浆加固的长期效果也是令人满意的。



(a) 变形随注浆加固时间的变化



(b) 变形率随注浆加固时间的变化

图 11 既有隧道在注浆加固期间和前后的变形和变形率
Figure 11 Deformation and deformation rate of the existing tunnel before, during, and after grouting reinforcement

在既有地铁隧道的整个监测区间范围内，3 种不同施工阶段中既有隧道的变形情况如图 12 所示，这 3 种施工阶段包括：新建隧道穿越前，地层注浆加固前以及注浆加固完成后。

由图 12 可知，在下穿施工扰动作用的影响下，既有地铁隧道的纵向差异沉降发生了很大的变化。在下穿施工之前，既有地铁隧道的最初 10 个月运行期内，管片环之间的差异沉降可以忽略不计。在注浆加固之前，在新建隧道的纵向投影范围内，既有隧道产生了较大的纵向沉降，相邻管片环之间的差异沉降明显增加，有的差异沉降甚至超过了 2 mm。最后，当地层

注浆加固完成后，既有地铁隧道的整体纵向沉降和管片环之间的差异沉降都得到了有效控制。

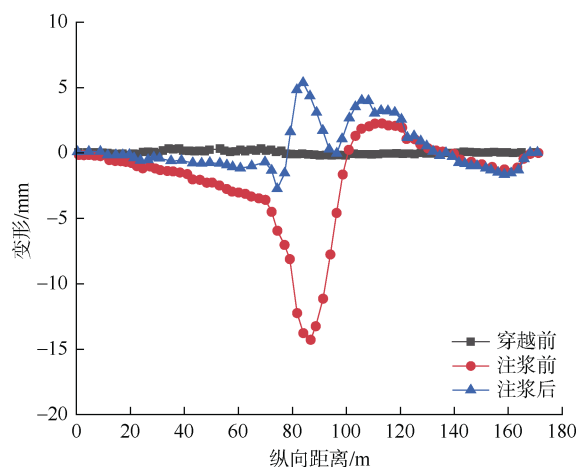


图 12 既有地铁隧道在不同施工阶段的整体纵向沉降

Figure 12 Overall longitudinal settlements of the existing subway tunnels at different construction stages

3 变形特征及韧性评价

3.1 变形区域的计算

对既有地铁隧道中第 9~20 环的变形监测结果按式(3)进行积分，得到了既有隧道在不同时期的纵向沉降和纵向隆起的变形区域面积，如图 13 所示，通过对比沉降区域和隆起区域的面积变化可以发现，在盾构机穿越既有地铁隧道的 5 d 以前，沉降区域面积和隆起区域面积的初始线性变化的斜率基本相似。然而，随着盾构机驶离既有地铁隧道，沉降区域的面积持续增加，而隆起区域的面积逐渐减少。

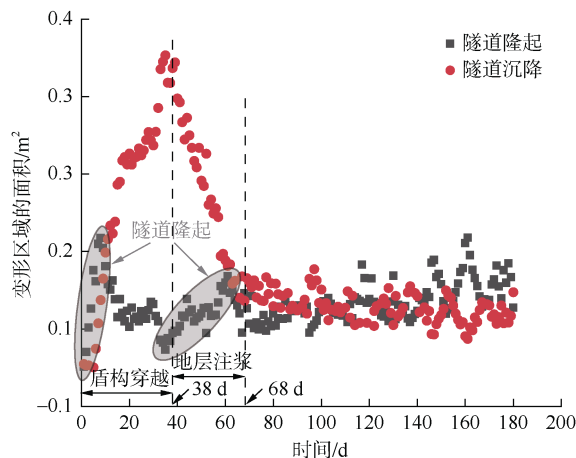


图 13 既有隧道的变形区域的面积随施工时间的变化

Figure 13 Variation of deformation-zone areas in the existing tunnel with construction progress

在下穿施工期间,既有地铁隧道的沉降区域面积超过了 0.4 m^2 ;在注浆加固期间,沉降区域的面积呈线性减少的趋势;在注浆加固结束时其面积约为 0.1 m^2 ,相当于注浆加固前最大沉降区域面积的 $1/4$ 。同时,在下穿施工和注浆加固的早期阶段,既有地铁隧道的隆起变形明显增加。关于既有地铁隧道隆起区域的面积变化,在下穿施工阶段的面积增长率明显大于注浆加固阶段的面积增长率。另外,在 68 d 处注浆完成后,既有地铁隧道的沉降区域面积和隆起区域面积均恢复到了大致相等的水平。

首先,在获得了既有地铁隧道变形区域面积的计算结果以后,可使用式(4)计算它们与最大沉降和最大隆起所对应的均匀变形区域面积的比值,即可确定性能指标 S_{re} 的值。然后,结合下穿施工扰动前的初始状态,使用式(5)对这些值进行标准化处理,以确保所得性能指标的值始终在 0 到 1 之间。最后,绘制既有地铁隧道的纵向相对差异沉降性能随时间变化的曲线 $Q(t)$,如图 14 所示,图中空心圆点表示由监测结果计算所得性能指标的值。

根据前文的分析可以看出,既有地铁隧道结构的纵向相对差异沉降性能衰减曲线 $Q(t)$ 可分为 4 个阶段:盾构下穿施工扰动阶段(前 15 d)、穿越后沉降持续发展阶段($15 \sim 38 \text{ d}$)、地层注浆加固阶段($38 \sim 68 \text{ d}$)以及注浆后沉降长期演化阶段(68 d 以后)。采用虚线在图 14 中划分了这 4 个阶段,图示表示并采用线性回归分析对相对差异沉降性能的散点数据进行拟合。

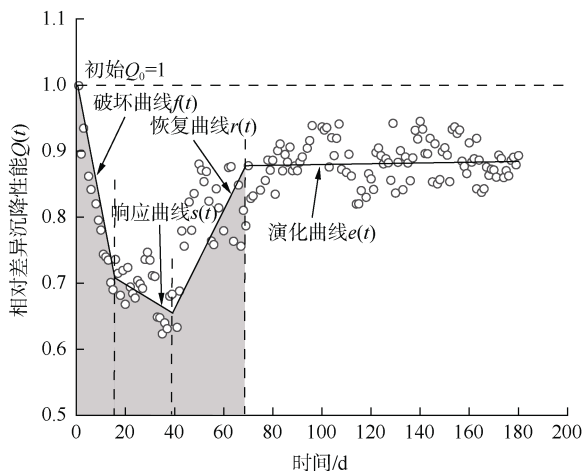


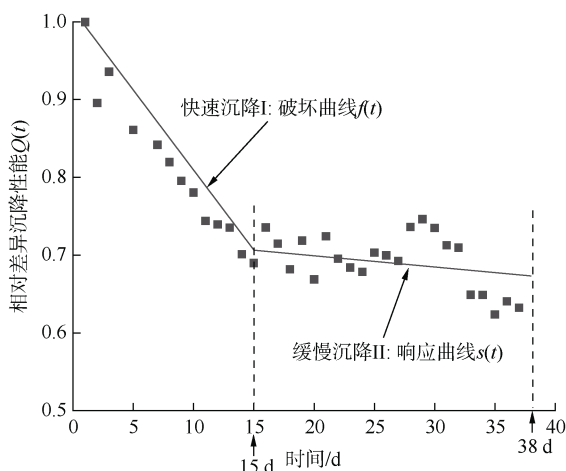
图 14 纵向相对差异沉降性能的衰减曲线

Figure 14 Performance degradation curve of longitudinal relative differential settlement

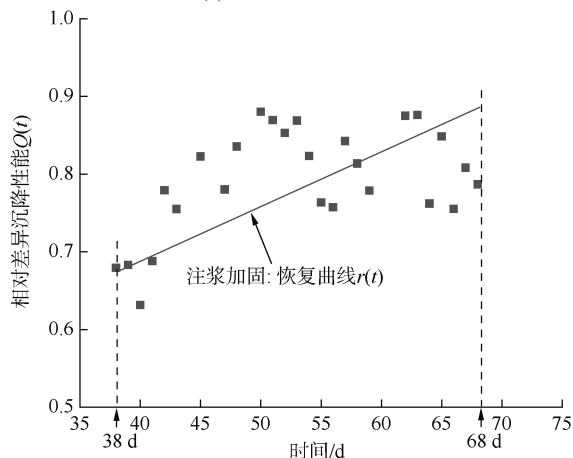
3.2 基于性能曲线的韧性评价

图 15 给出了既有地铁隧道在不同阶段的相对差

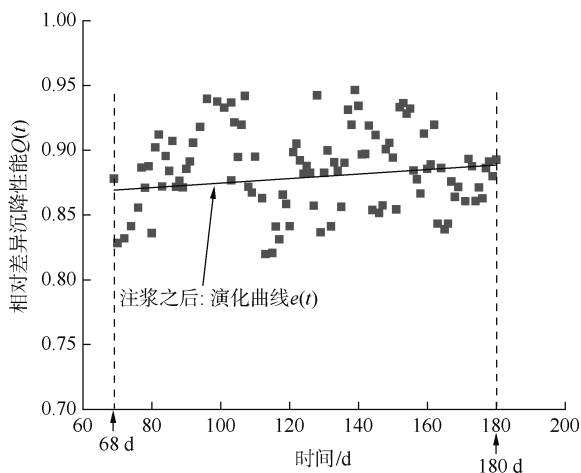
异沉降性能拟合关系曲线。对 15(a)所示相对差异沉降的性能数据进行拟合可以发现,在盾构下穿施工扰动阶段,其性能曲线表现为快速沉降 I;在穿越后沉降持续



(a) 破坏阶段拟合的性能曲线



(b) 恢复阶段拟合的性能曲线



(c) 演化阶段拟合的性能曲线

图 15 既有地铁隧道相对差异沉降的性能变化

Figure 15 Performance changes of relative differential settlement in the existing metro tunnels

发展阶段,其性能曲线表现为缓慢沉降 II。在图 15(a)中, I 和 II 分别对应破坏曲线 $f(t)$ 和响应曲线 $s(t)$, 如式(6)和(7)所示。

$$f(t) = -1.7 \times 10^{-2}t + 1.0 \quad 0 \leq t \leq 15 \quad (6)$$

$$s(t) = -1.4 \times 10^{-3}(t-15) + 0.71 \quad 15 \leq t \leq 38 \quad (7)$$

在盾构下穿施工扰动阶段,既有地铁隧道相对差异沉降的性能相较于其初始状态的性能约损失了 29%,这意味着既有隧道易损性的值为 0.29,鲁棒性的值为 0.71。在穿越后沉降持续发展阶段,随着盾构机逐渐远离既有地铁隧道,既有隧道的沉降速率明显减小,此时相较于其初始状态的性能降低了约 3.3%,此时既有地铁隧道相对差异沉降的性能为 0.677。

如图 15(b)所示,在地层注浆加固阶段,注浆加固在 68 d 结束。由此可以看出,在地层注浆加固之后,既有地铁隧道的相对差异沉降的性能从 0.677 提高到 0.868,约占下穿施工期间性能损失的 59.1%,说明地层注浆加固对既有地铁隧道纵向相对差异沉降的性能有非常显著的影响。根据拟合的结果获得的恢复曲线如式(8)所示。

$$r(t) = -6.4 \times 10^{-3}(t-38) + 0.677 \quad 38 \leq t \leq 68 \quad (8)$$

如图 15(c)所示,在 68 d 处停止注浆以后,既有地铁隧道的相对差异沉降的性能在随后的 112 d 内保持稳定,而且该性能恢复的幅度较小。根据拟合的结果可获得注浆后沉降长期演化阶段的性能曲线 $e(t)$, 如式(9)所示。

$$e(t) = 1.21 \times 10^{-4}(t-68) + 0.868 \quad 68 \leq t \leq 180 \quad (9)$$

此时结合式(2)即可推导出性能衰减曲线 $Q(t)$ 在不同阶段所对应的权重系数,即 F 、 S 和 R ; 然后将其代入式(1)中,即可求得韧性指标 Re 的值。如图 14 所示,灰色区域代表既有地铁隧道结构的残余性能,灰色区域与正常性能区域的面积比值即为既有地铁隧道的相对差异沉降的韧性指标 Re 。

需要注意的是,地铁隧道结构的性能通常会随着运行时间的推移而逐渐衰减,但是在本文所描述的工程案例中,既有地铁隧道仅投入使用 10 个月后就受到了新建盾构隧道下穿施工的扰动。因此,假设既有地铁隧道受扰动前的性能处于满负荷状态,其性能 Q 的值为 1.0,并且在正常情况下保持不变。在此基础上,计算得到的韧性指标值为 0.764,这表明既有地铁隧道在经历下穿施工和注浆加固后的残余性能是其正常性能的 76.4%。虽然既有地铁隧道遭受了扰动影响,但是通过采取合理的加固措施,既有隧道依然具有较高的性能。

林星涛等^[10]根据韧性指标的取值范围提出了管片韧性等级的划分,可为评估隧道结构在受扰动后的恢复能力提供标准,并强调了及时采取措施的重要性,见表 1 所示。由表 1 可知,韧性指标 Re 的值小于 $0.50Re_0$, 则被归类为低韧性,说明此时管片的性能已下降至需要高度重视的水平。另外出于安全因素的考虑,中等韧性和高韧性之间的划分边界为 $0.75Re_0$ 。结合本文计算获得的韧性指标的值可以发现,其对应的韧性等级为高韧性。因为该既有地铁隧道投入运行的时间不长,而且当隧道出现问题后,在很短的时间内就及时采取了地层注浆加固的施工措施,所以其高韧性等级是合理的。同时 HUANG 等^[8]认为:监测系统和修复措施在检测隧道早期病害迹象以及控制隧道结构性能方面起到了至关重要的作用。通过有效的监测和及时的修复,可以最大限度地减少隧道结构的危险,确保其长期安全运营。

表 1 管片的韧性等级范围

Table 1 Resilience rating scale for tunnel structures

取值范围	等级
$0 < Re \leq 0.50Re_0$	低韧性
$0.50Re_0 < Re \leq 0.75Re_0$	中韧性
$0.75Re_0 < Re \leq Re_0$	高韧性

4 韧性评价的结果讨论

根据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》^[15],地铁隧道结构的沉降和差异沉降均为实际工程中必测的核心监测指标。其最大沉降属于整体变形且多为均匀沉降,对隧道结构的安全影响小,可是还有一些文献^[8,10]将管片的最大沉降作为隧道结构的性能指标;而最大差异沉降则会造成管片错台、接缝张开及螺栓应力超限等病害,所以最大差异沉降将直接威胁隧道结构的安全应被重点关注。因此本节为了更全面地评估隧道的性能,分别选取了 2 种不同的沉降量指标计算隧道的性能,包括:最大沉降 $\omega_{\max}$ 和最大差异沉降 $\omega_{\text{diff,max}}$ 。通过式(10)和(11)分别对最大沉降 $\omega_{\max}$ 和最大差异沉降 $\omega_{\text{diff,max}}$ 进行标准化处理,将其变换形式后即可表示为管片的性能指标 $Q(t)$ 。

$$Q_{\omega_{\max}}(t) = \frac{|\omega^{\text{st}}| - |\omega_{\max}|}{|\omega^{\text{st}}|} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \omega_{\text{diff}} = \omega_1 - \omega_{1-1} \\ Q_{\omega_{\text{diff,max}}}(t) = \frac{|\omega_{\text{diff}}^{\text{st}}| - |\omega_{\text{diff,max}}|}{|\omega_{\text{diff}}^{\text{st}}|} \end{cases} \quad (11)$$

式中, ω_i 为第 i 环管片实测沉降; ω^{st} 为管片沉降的警戒值; $\omega_{\text{diff}}^{\text{st}}$ 为管片防水要求及螺栓变形极限的控制值。

结合相关规范^[14-15]可以发现, 管片累积沉降控制值为 20 mm, 两环管片之间的差异沉降控制值为 8 mm。

根据既有地铁隧道的变形监测数据, 绘制了以 $Q_{\omega, \max}(t)$ 和 $Q_{\text{diff}, \max}(t)$ 为特征的性能曲线, 如图 16 所示。由图 16(a) 可知, 根据最大沉降所计算出的性能, 在下穿施工过程中从 1.0 急剧下降至 0.29; 在注浆加固过程中, 管片性能得到了明显的改善; 尤其是在注浆结束后性能维持在 0.9 左右。由图 16(b) 可知, 最大差异沉降的性能相较于最大沉降的性能有明显不同的变化趋势。在下穿施工结束后, 根据最大差异沉降所计算出的性能为 0.74; 在注浆结束后其性能仅恢复到 0.77 左右。

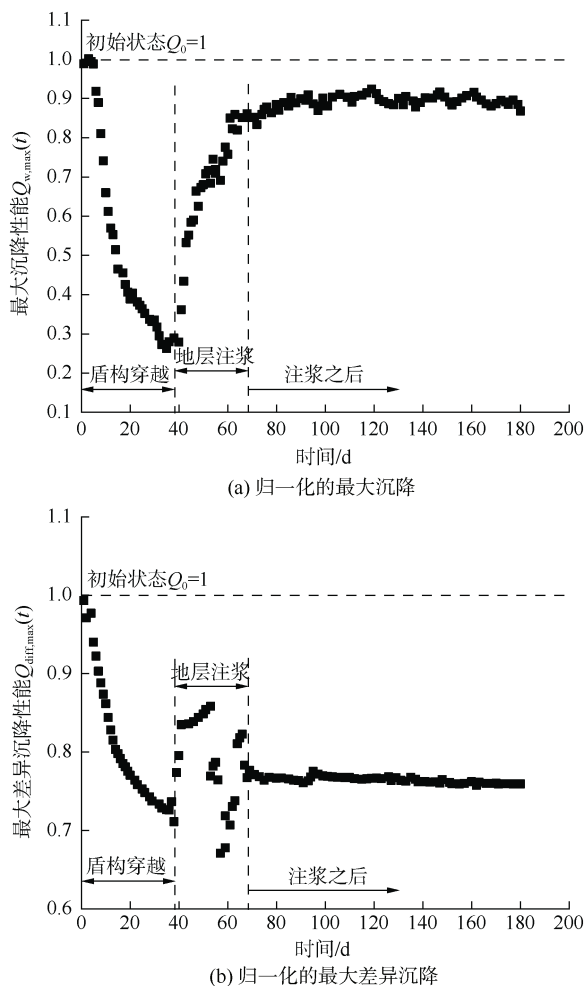


图 16 最大沉降和最大差异沉降的性能变化

Figure 16 Performance changes of maximum settlement and maximum differential settlement

此外, 2 个性能指标之间的恢复率和变化模式也存在差异。在注浆加固过程中, 最大沉降的性能呈现

连续的非线性增长趋势; 而最大差异沉降的性能在 [0.73, 0.88] 的范围内出现了明显的波动。这种情况可能是由于间歇性的重复注浆改变了隧道仰拱下方土体的应力分布, 从而引起隧道的局部隆起; 而且隧道周围土体性质的差异以及注浆前的原始沉降, 都可能进一步加剧隧道的差异沉降^[13]。因此, 为了减少最大差异沉降的性能波动, 就要让浆液在整个加固范围内均匀地分布。

利用最大沉降和最大差异沉降这 2 个性能指标计算的韧性指标 Re 值分别为 0.581 和 0.791, 二者分别对应于表 1 中的中韧性等级和高韧性等级, 表明文献 [8, 10] 将最大沉降作为性能指标所建立的韧性评价模型低估了实际风险状态, 本文模型的评价结果显然更有优势。然而, 使用最大沉降和最大差异沉降评估隧道结构的性能时, 结果的准确性会受到人为设定的阈值的影响, 而使用相对差异沉降的面积比则可以避免这个问题。在实际工程中, 如果只关注最不利的工况, 可能会高估隧道结构的危险状态, 也可能会低估隧道结构的恢复能力。

5 结论

本文提出一个盾构隧道纵向结构的韧性评价模型, 结合上海市域线机场联络线新建盾构隧道下穿地铁 15 号线既有隧道工程的现场监测数据, 推导严重扰动状态下既有地铁隧道在不同阶段的管片性能曲线方程, 并验证该模型在隧道纵向结构韧性评价中的合理性和适用性。本文所得主要结论如下:

1) 在新建盾构隧道施工过程中, 既有地铁隧道的变形和盾构掘进参数发生了显著的变化。当盾构机距离既有隧道仅有 40 m 时, 其掘进速度逐渐降低; 当盾构机下穿既有隧道时, 同步注浆量和盾构推力均减小, 并在穿越后恢复正常水平。同时在盾构下穿施工期间, 既有地铁隧道的沉降线性增加。

2) 基于相对差异沉降所提出的既有地铁隧道纵向性能指标, 有效地描述了新建盾构隧道施工的扰动影响。在下穿施工过程中, 既有隧道的性能损失了 32.3%, 特别是在盾构机穿越后的前 10 d 内, 其性能出现了急剧下降。地层注浆加固的措施使其成功地恢复了 59.1% 的性能, 在注浆结束后性能依旧保持稳定。

3) 根据既有地铁隧道相对差异沉降的性能指标, 可以计算出的隧道结构的韧性指标 Re 值为 0.764, 其值大于 $0.75Re_0$, 该既有隧道的结构属于高韧性等级。

关于既有地铁隧道结构的韧性评价,本文所提出的相对差异沉降的性能指标优于最大沉降的性能指标,该指标提供了更加连续且准确的隧道纵向结构的性能表征。

参考文献

- [1] 钱伟丰. 海域吹填砂地层盾构隧道开挖面被动失稳机理与极限支护压力研究[D]. 福州大学, 2024.
QIAN Weifeng. Study on the passive failure mechanism and ultimate support pressure of shield tunnel faces in coastal backfill sand strata[D]. Fuzhou University, 2024.
- [2] 张治国, 程志翔, 张孟喜, 等. 考虑衬砌渗透性的盾构下穿既有隧道纵向结构错台变形研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(11): 180-194.
ZHANG Zhiguo, CHENG Zhixiang, ZHANG Mengxi, et al. Dislocation deformation of existing longitudinal tunnel structure induced by shield tunneling by under-crossing considering influence of lining permeability[J]. China journal of highway and transport, 2022, 35(11): 180-194.
- [3] 马伟亮, 李顺群, 叶茂松, 等. 基坑开挖对邻近隧道变形影响的解析方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(2): 446-455.
MA Weiliang, LI Shunqun, YE Maosong, et al. Analysis on the influence of foundation pit excavation on the deformation of adjacent tunnels[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2023, 19(2): 446-455.
- [4] ZHANG Jinzhang, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Effect of ground surface surcharge on deformational performance of tunnel in spatially variable soil[J]. Computers and geotechnics, 2021, 136: 104229.
- [5] 惠昌武, 许得杰, 巩亮, 等. 基于主成分分析法的城轨运营安全评价指标体系研究[J]. 都市快轨交通, 2024, 37(2): 131-138.
HUI Changwu, XU Dejie, GONG Liang, et al. Urban rail operation safety evaluation index system based on principal component analysis method[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 131-138.
- [6] 施莉娟, 张琦芮, 金建飞, 等. 基于模糊综合评价法的有轨电车运营风险评估[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(2): 162-166.
SHI Lijuan, ZHANG Qirui, JIN Jianfei, et al. Risk assessment of tram operation based on the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(2): 162-166.
- [7] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual review of ecology and systematics, 1973, 4: 1-23.
- [8] HUANG Hongwei, ZHANG Dongming. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application[J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 51: 301-312.
- [9] JIANG Long, HAO Shengyue. 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.
- [10] LIN Xingtao, CHEN Xiangsheng, SU Dong, 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Dongming, YE Zhenwei, ZHANG Jinzhang, et al. Influence of grouting on rehabilitation of an over-deformed shield tunnel lining in spatially variable soil[J]. Computers and geotechnics, 2022, 152: 104999.
- [14] 上海市住房和城乡建设管理委员会. 城市轨道交通结构安全保护技术标准: DG/TJ08-2434-2023[S]. 上海: 同济大学出版社, 2023.
Shanghai Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development. Technical standard for safety protection of urban rail transit structures: DG/TJ08-2434-2023[S]. Shanghai: Tongji University Press, 2023.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

(编辑: 傅依萱)