

DOI: 10.11779/CJGE20211459

道路填土引发软土地铁盾构隧道变形案例及整治技术

王如路¹, 袁强², 梁发云^{*2}, 王鲁杰^{1,2}

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 200070; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 随着轨道交通网络的逐渐完善以及城市化的不断推进, 临近地铁隧道的加、卸载工况频发, 对地铁隧道的健康状态产生不利的影响。上海某地铁区间由于道路填土导致隧道发生了 159 mm (也即 25.6‰ D , D 为隧道直径) 的横向大变形, 引起结构产生漏水漏泥、接头张开等严重的结构病害。全面记录了该工程案例的详细情况, 包括工程地质资料、道路施工情况、隧道变形形式以及后续的变形整治措施等, 并对整治效果进行了定量分析, 特别是侧向微扰动注浆技术的修复效果。现场数据表明: 道路施工引起隧道横向变形增量约为 30~50 mm, 局部明浜回填会加剧变形的发展; 侧向微扰动注浆能够有效地修复隧道已发生的横向变形, 且注浆量与隧道变形量存在定量关系, 并且明显受到注浆前隧道变形量大小的影响; 道路卸载后回填以及后续的钢板加固, 能够在保证工程建设的同时, 又能保证隧道结构的安全。

关键词: 道路填土; 地铁隧道; 收敛变形; 变形整治; 注浆技术

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)01-0112-10

作者简介: 王如路(1962—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事运营软土盾构隧道结构安全方面的研究和管理工作。E-mail: wrl62@live.cn。

Case study and treatment technology for deformed shield tunnel in soft soils induced by road construction

WANG Rulu¹, YUAN Qiang², LIANG Fayun^{*2}, WANG Lujie^{1,2}

(1. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the gradual improvement of urban rail transit network and the development of urbanization in China, the loading and unloading conditions near the metro tunnels are becoming more and more frequent, which seriously threaten the safety of the lining structures and their serviceability. A field case of deformed shield tunnel in Shanghai caused by road construction is introduced. The transverse deformation of the tunnel is very large, which is 159 mm (i.e., 25.6‰ D , D is the tunnel diameter), resulting in serious structural damage, such as water leakage, mud leakage, joint opening, etc. The details of the field case are comprehensively recorded, including engineering geological data, road construction, tunnel deformation forms and subsequent deformation treatment measures, and a quantitative analysis is made on the treatment effects, especially the repair effects of lateral small disturbance grouting technology. According to the monitoring and inspection data, it is found that the convergence deformation caused by road construction is about 30~50 mm, which can be exacerbated by the river backfilling. The soil grouting at the both sides of the tunnel spring line can reduce tunnel convergence effectively, and the effectiveness is closely related to the magnitude of tunnel convergence before grouting. The installation of steel plates can improve the bearing capacity of tunnel lining ring so as to ensure the road construction and the safety of the tunnel.

Key words: road construction; shield tunnel; convergence deformation; rehabilitation; grouting technology

0 引言

为了有效地缓解地面交通压力, 轨道交通在大型城市得到了快速发展。以上海地区为例, 截至 2021 年底, 上海已建成的轨道交通运营线路达到了 19 条, 其中以盾构隧道结构为主的地下线路占到了 2/3 以上。面对如此庞大的运营网络, 隧道周围的环境不可

避免地会发生变化, 并且伴随着城市化进程的不断发
展, 这种环境变化也变得愈加频繁。总的来说隧道周
围环境变化可以分为两类: ①卸载工况, 主要由基坑

基金项目: 上海市优秀技术带头人计划项目 (21XD1430900)

收稿日期: 2021-12-25

*通信作者(E-mail: fylang@tongji.edu.cn)

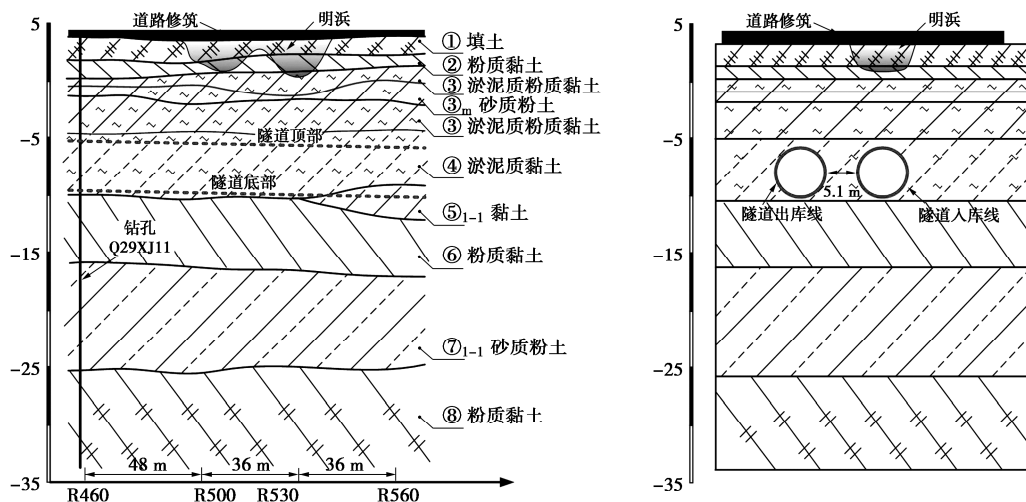


图1 隧道地质纵横剖面示意

Fig. 1 Geological profile of tunnel

或隧道开挖等活动引起的^[1-2]; ②加载工况, 主要由违规弃土、道路修筑、河道回填等工程活动引起的^[3-4]。加载、卸载均会导致附加应力场和位移场的出现, 从而破坏隧道原有的平衡状态。与其他方法相比, 盾构法隧道结构存在大量的接缝, 多缝的特点使得隧道在环向和纵向上的整体刚度均有所折减, 周围环境变化极易导致盾构隧道变形, 继而引发一系列的结构病害, 给隧道安全运营带来隐患^[5-7]。

目前, 关于卸载工况隧道变形的研究成果较为丰富, 如郑刚等^[8]、Liu等^[9]报道了深基坑开挖引起隧道出现大变形的现场案例; Liang等^[10]、魏纲等^[11]分别从理论上提出了卸载工况下隧道变形的理论计算模型; Ng等^[12]、陈仁朋等^[13]通过离心模型试验分析了基坑开挖对隧道变形和内力的影响。这些研究成果可为卸载工况下隧道的变形管控提供参考。

近年来, 地面加载逐渐成为危害隧道安全的一种常见工况, 相关学者已取得了一些研究成果, 如文献^[14~17]分别从理论上计算了隧道的沉降响应, 王如路等^[18]采用三维数值方法分析了隧道的收敛变形以及结构损伤, 黄大维等^[19]、梁发云等^[20]通过模型试验研究了堆载作用下隧道变形响应。然而, 这些研究成果均是在特定的荷载分布假设条件下得到的, 与实际情况存在一定的差异, 并且罕有涉及到隧道大变形的整治技术。邵华等^[21]报道了上海浦东新区某隧道区间由于地面违规弃土导致隧道产生横向大变形, 甚至出现了螺栓断裂的安全隐患, 但没有对注浆修复效果进行定量分析。

本文以上海地铁某区间线路为研究背景, 全面记录了该工程案例的详细情况, 通过实测数据分析地面道路加载和明浜回填对正下方隧道结构变形和病害特征, 并提供了隧道大变形治理方案, 对整治效果进行定量评价, 重点分析了侧向微扰动注浆下隧道的变形

规律, 探讨了初始收敛变形和注浆有效率、管片体积变化量和有效注浆量之间的定量关系, 可供类似工程借鉴和参考。

1 工程概况

1.1 地质资料

2020年8月22日, 监测数据表明上海地铁某线路区间隧道收敛变形有较大的异常变化, 部分区段收敛变形监测值超过设计值60 mm, 最大值为159 mm。现场调查数据表明, 隧道内部渗漏水及漏泥现象明显, 局部区域甚至出现了管片接头碎裂的结构损伤现象, 如不及时治理将严重威胁到隧道结构安全。

盾构区间工程地质资料表明(如图1所示), 地铁隧道穿越③淤泥质粉质黏土层和④淤泥质黏土层, 下卧⑥粉质黏土层(局部下卧⑤₁₋₁黏土层), 隧道顶部埋深约为7.5~10 m(埋深比约为1.2~1.6), 属于浅埋隧道。盾构隧道由6块管片通缝拼装而成, 外径为6.2 m, 内径为5.5 m, 土体物理力学试验表明隧道穿越层具有高含水率(约为40%)、高孔隙比(约为1.2~1.4)、高压缩性(压缩模量小于2.5 MPa)和低强度(比贯入阻力小于1 MPa)的特性, 一旦受到扰动将导致土体强度明显降低。

1.2 隧道上方道路施工概况

在区间隧道收敛变形出现异常变化后, 有关单位立即进行现场踏勘。经核查, 隧道病害区段对应的地面上方为某市政工程路口位置, 线路正上方的道路分布如图2所示, 新建道路位于该线路上方, 路面设计标高为4.63~6.75 m, 填土高度为0.1~2.43 m。

地质资料和现场勘察表明, 该路段存在两条明浜, 明浜宽度几乎与入库线隧道结构同宽, 长度分布于

R460 (K1+080)—R560 (K1+180), 且走向与入库线隧道几乎重合。#2 明浜水面深度约为 0.3 m, 淤泥深度约为 1.5 m, #3 明浜水面深度约为 1.7 m, 淤泥深度约为 1 m。大面积、大体量的持续加载施工以及明浜回填是造成下方地铁隧道出现严重变形的直接诱因。

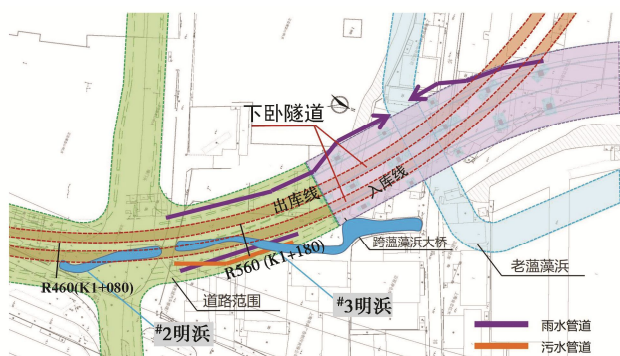


图2 线路正上方道路分布

Fig. 2 Road construction above tunnel

2 道路施工对隧道结构的影响分析

隧道出现收敛大变形后, 有关单位立即在现场布置了变形监测点, 隧道收敛变形监测点位如图 3 所示。为更好地捕捉后续隧道大变形整治过程中的结构变形特征, 针对重点截面采用自动化监测结合人工测量手段联合监测隧道收敛变形。

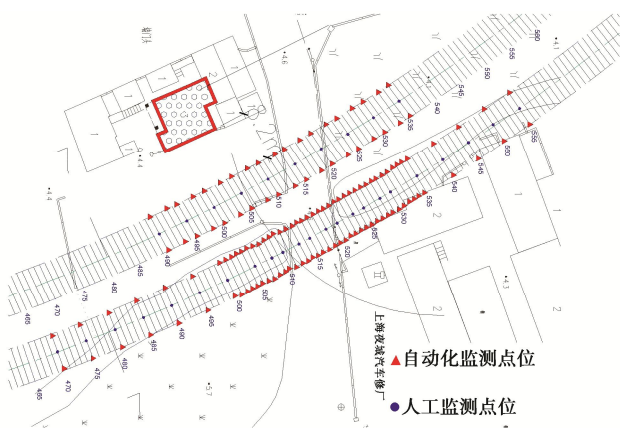


图3 隧道收敛变形监测点位布置方案

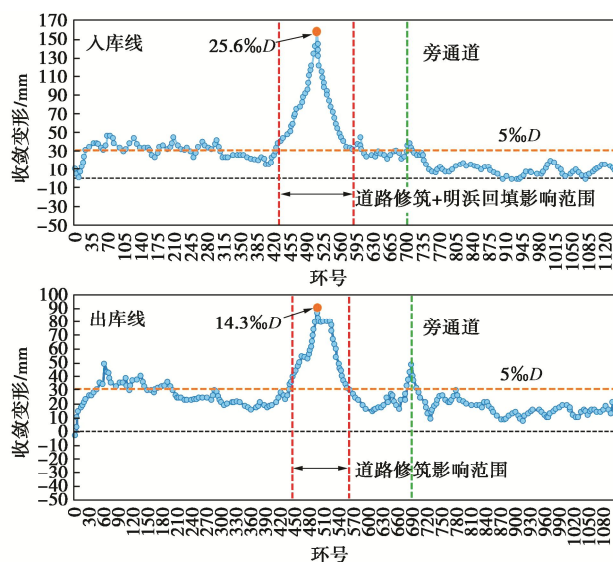
Fig. 3 Layout of monitoring points for convergence deformation of tunnel

2.1 隧道收敛变形和接头张开

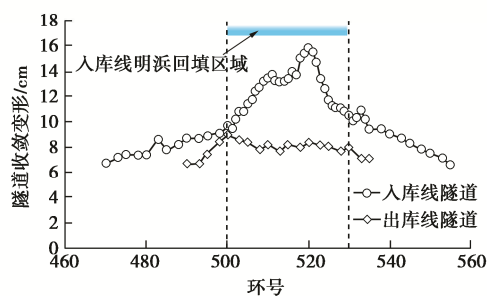
如图 4 (a) 所示, 受地面道路施工影响, 隧道出库线和入库线均出现了不同程度的收敛变形, 最大收敛变形均远高于规范的限定值 ($5\%D$), 入库线中收敛变形大于 100 mm 有 25 环, 其中最大收敛值为 159 mm, 出现在 R520 环, 与隧道设计直径 D 的比值高达 25.6%; 出库线管片最大收敛值为 89 mm, 出现在 C500

环, 与隧道设计直径 D 的比值为 14.3%。两条隧道的管片结构出现了明显的病害, 从而威胁隧道的结构安全。

如图 4 (b) 所示, 道路施工范围内入库线隧道的收敛变形明显大于出库线隧道, 其原因主要在于入库线 R500—R530 对应的地面存在明浜回填, 对应区间的隧道收敛变形是由明浜回填和道路施工共同作用的结果。入库线远离明浜回填区域管片的收敛变形与出库线基本一致 (60~80 mm), 可以认为出库线隧道的收敛变形主要是由正上方道路施工引起的。从图 4 (a) 可以知道, 未进行道路施工区域隧道的收敛变形约为 30 mm, 与出库线隧道的收敛变形进行比较, 可以得到道路施工引起的隧道收敛变形增量为 30~50 mm。



(a) 出/入库线全长范围内隧道的收敛变形



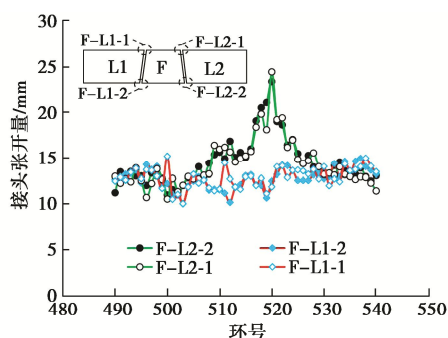
(b) 道路施工范围内隧道的收敛变形

图4 隧道的收敛变形

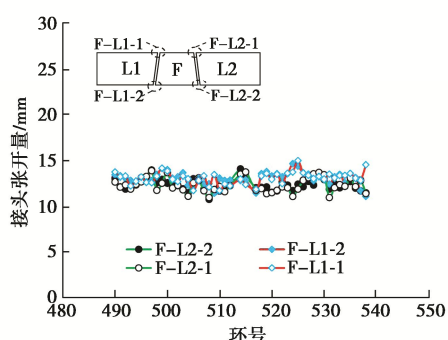
Fig. 4 Horizontal convergence deformations of tunnel

为进一步弄清楚隧道结构变形的具体情况, 现场使用游标卡尺测量封顶块 (F) 与两个邻接块 (L1 和 L2) 之间的接头张开量, 如图 5 所示。就入库线隧道而言, 在 R500—R530 环区间内, F 与 L2 之间的接头张开量明显大于 F 与 L1 之间的接头张开量; 在 R490—R500 环以及 R530—R540 环区间内, 两个接头的张

开量大小基本一致。主要原因在于入库线隧道上方两条明浜与隧道存在一定的偏差, 由此导致入库线隧道出现了一定程度的偏载, 隧道横截面出现了非对称的变形模式 (如图 6 (a) 所示)。



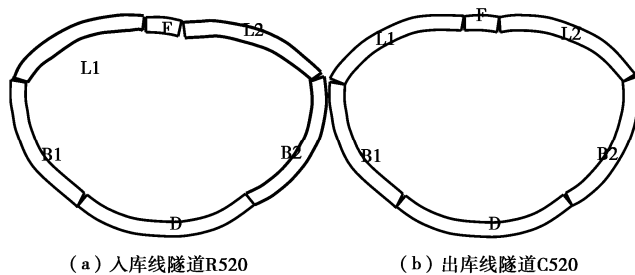
(a) 入库线隧道



(b) 出库线隧道

图5 接头张开量

Fig. 5 Values of longitudinal joint opening



(a) 入库线隧道R520

(b) 出库线隧道C520

图6 隧道横截面变形模式

Fig. 6 Deformation modes of tunnel cross-section

与入库线隧道相比, 出库线隧道的变形主要是由于道路施工引起的, 作用在隧道上的附加荷载基本上对称分布, 继而造成隧道横截面变形模式也基本对称 (如图 6 (b) 所示), 因此两个接头的张开量大小基本一致, 平均张开量为 12 mm。文献[20]的室内试验结果表明, 偏心荷载和对称荷载均会造成隧道肩部接头出现一定程度的张开, 相较顶部接头而言, 肩部接头的张开更加容易造成管片渗漏水的出现, 这一点将会在下文中进一步分析。

2.2 道路回填引发的结构病害

外部荷载作用下, 隧道结构通常会呈现如图 6 所

示的“横鸭蛋”变形, 顶部和底部接头内表面张开、肩部接头外表面张开。相对而言, 接头外表面张开更容易导致弹性密封垫失效, 引起隧道出现漏水漏泥现象发生。现场调查结果表明, 隧道内部漏水漏泥现象比较严重, 并伴随管片出现局部剥落和裂缝的情况, 如图 7 所示。



图7 管片病害

Fig. 7 Tunnel defects caused by road construction

根据现场统计的管片内部渗漏水现象分析, 地面道路施工下入库线隧道在 R475—R550 区域出现明显的渗漏水现象, 其收敛值为 73~159 mm, 大多居于 100 mm 左右; 而出库线 C495—C500 也出现湿迹, 其收敛值为 71~89 mm, 大多居于 80 mm 左右。由于明浜回填造成入库线隧道的收敛变形偏大, 导致接头张开明显, 渗漏水现象更为严重。隧道收敛变形和渗漏水现象的关联性表明, 当隧道收敛变形大于 70 mm 后, 隧道接头可能出现渗漏水。

3 隧道大变形整治技术及效果分析

3.1 隧道大变形整治技术

根据上文中隧道结构的收敛变形和病害统计结果可以知道, 道路施工以及明浜回填引起隧道结果出现严重的收敛变形, 最大收敛值高达 25.6‰D, 远高于规范的限定值 5‰D, 由此引发管片混凝土压碎、掉块、漏水漏泥等一系列的结构病害, 严重威胁到隧道结构及运营安全。同时, 相比于收敛变形, 隧道纵向响应比较小, 远未影响到结构安全。因此, 隧道结构整治工作主要围绕横断面收敛变形进行, 具体整治包括堵漏、侧向微扰动注浆、地面道路卸载和回填、隧道内部钢板加固等 4 个主要的修复措施。

(1) 堵漏

由于管片接头是隧道防水的薄弱部位, 地下水通常通过这些部位进入隧道内部。隧道渗漏水出现后, 水土流失会导致了侧向压力的损失, 从而加剧横向变形和渗漏水的恶性循环发展。聚氨酯具有遇水膨胀发泡的特性, 容易在管片外壁形成隔水膜, 可以有效地堵塞渗水通道, 阻止外部水源进入隧道内部, 减缓渗漏水病害。如图 8 所示, 现场优先通过标准块上的注

浆孔向管片壁后注入聚氨酯进行堵漏,对于渗漏面积大且严重的区域,则利用邻接块上的注浆孔进行注浆处理,现场聚氨酯注浆采用两侧对称压注的方式进行。

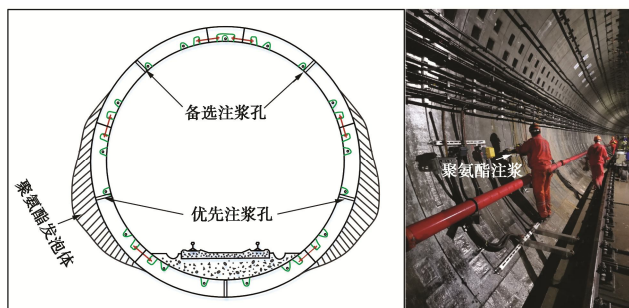


图8 聚氨酯注浆堵漏

Fig. 8 Polyurethane grouting for waterproof

(2) 侧向微扰动注浆

为防止该区域隧道变形的进一步加剧,减缓隧道结构病害的恶化,采用微扰动注浆对该区间隧道变形进行修复。注浆示意图如图9所示,由于出入库线隧道相距 5.1 m,并且入库线隧道的收敛变形大小及范围均大于出库线隧道,故对 C495—C535 环外侧 4.2 m 及 3.6 m 位置进行 2 排注浆,对 R455—R560 环外侧 4.2, 3.6 m 位置及内侧 2.4, 2.7 m 进行 4 排注浆,计划注浆 506 孔。加固深度为隧道底以上 5.2 m 内,注浆孔沿隧道纵向孔距为 1.2 m,横向孔距为 0.6 m。

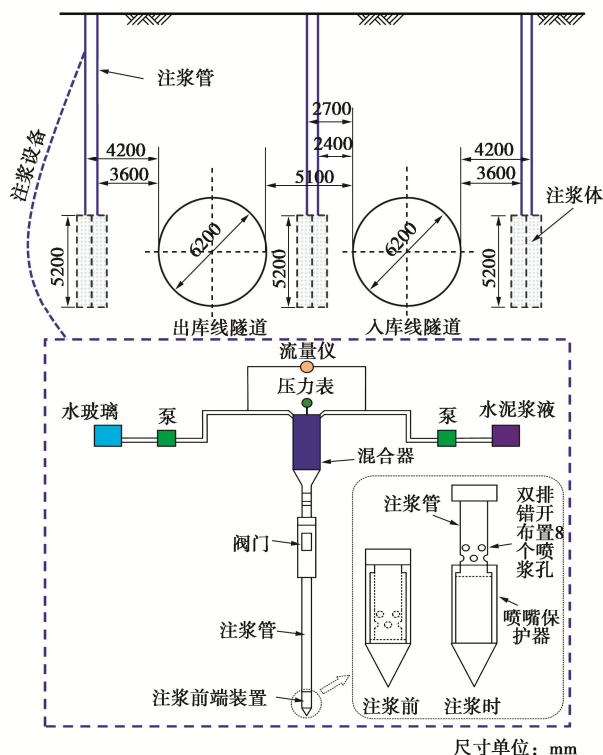


图9 注浆示意图

Fig. 9 Diagram of grouting treatment

(3) 道路卸载和回填

入库线隧道正上方存在两条明浜,道路施工和明浜的直接回填是造成隧道出现收敛大变形的主要原因(图4)。对其卸载成为控制隧道进一步变形的重要措施,结合实际工程的需要,采用 EPS 材料对隧道正上方的道路施工区域进行回填处理,从而减小路面荷载、降低作用在隧道顶部的附加荷载,继而减轻道路施工对下卧隧道的变形影响。换填过程中涉及到地表超挖,超挖深度确定的主要原则:①保证路面设计高度不变;②道路换填以及明浜回填不会产生新的附加荷载。

(4) 钢板加固

通过对隧道收敛变形和接头张开量分析,入库线隧道 R480—R545、出库线隧道 C490—C530 收敛变形大于 60 mm,并出现了渗漏水、管片裂缝、掉块、接头张开等病害,说明隧道结构刚度出现衰减。文献[22]认为,当软土地区隧道收敛变形超过 80 mm 后,隧道结构对外界条件的变化十分敏感,需要对隧道进行结构补强措施。Liu 等[23]的足尺试验结果表明,采用钢板加固后,隧道的刚度和承载能力分别提高了 31% 和 38%。上海 2 号线局部大变形区域同样也曾采用钢板对隧道结构进行补强,加固后长期效果良好[21]。因此本案例同样采用钢板进行结构加固。图 10 为现场采用钢板加固的示意图,管片全环加固体系由 5 块厚度为 30 mm、宽度为 850 mm 钢板以及 2 根钢拉板,其中钢板 1 和钢板 2 带有牛腿结构,钢板布置方案可参见文献[21, 23]。

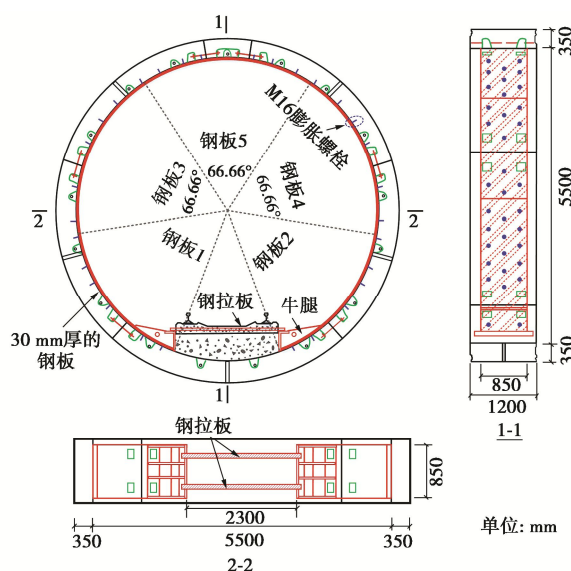


图10 钢板加固示意图

Fig. 10 Reinforcement of tunnel by steel plate

3.2 隧道整治效果分析

在变形修复过程中,对隧道相关区域的垂直位移、水平位移、收敛变形以及封顶块接头张开量进行量

测。现场注浆过程中管片环会在注浆压力作用下出现一定的水平位移, 过大的水平位移会导致管片环横向错台变形的产生, 可能引发环缝出现渗漏水。为避免这个问题, 沿隧道纵向采用跳孔注浆的方式, 并遵循“均匀、少量、多点、多次”的有序可控注浆原则进行。

注浆过程中隧道的竖向位移和水平位移如图 11 所示。由图 11 可以看出, 隧道发生了一定程度的隆起变形, 最大隆起量约为 11 mm, 出现在入库线隧道 R510—R520 区间内, 由于注浆过程中也伴随着道路卸载, 因此隧道的隆起变形是注浆和卸载共同作用的结果。此外, 注浆过程中入库线隧道的水平位移量大于出库线隧道, 但是平均变形量分别约为 2, 1 mm, 且最大横向错台量小于 2 mm, 对隧道横向水平位移影响比较小, 说明注浆安排比较合理。

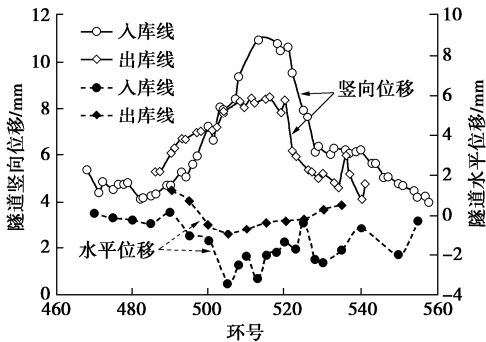


图 11 注浆过程中隧道发生的位移

Fig. 11 Displacements of tunnel during grouting

注浆前后的隧道收敛变形如图 12 所示, 图 12 中隧道收敛变形改善量是指注浆前后隧道收敛变形的差值。入库线隧道的收敛变形改善量最大值为 72 mm, 出现在 R525 环; 出库线隧道收敛变形改善量最大值为 59 mm, 出现在 C510 环。由于在 R500—R530 环区域内注浆孔的分布密度高, 使得该区域内隧道收敛变形改善量明显大于其他区域。

注浆过程中, 隧道收敛变形随时间的变化趋势如图 13 所示。在 R505—R535 环区间内 (如图 13 (a) 所示), 隧道收敛变形整体呈现快速减小的趋势。在 8 月 30 日—9 月 2 日及 9 月 26 日—10 月 1 日这两个时间段内注浆工作暂时停止, 导致收敛变形变化量有所减小; 11 月 29 日以后, 对若干已完成的注浆孔进行重复注浆, 使得收敛变形变化量有所增加。在 R470—R500 环及 R540—R555 环区间内, 由于注浆点比较少, 收敛变形变化量明显小于 R505—R535 环。对比这两个区间的收敛变形变化量, 说明注浆量对收敛变形具有明显影响。出库线隧道收敛变形的变化趋势

(图 13 (a)) 与入库线基本一致, 不再赘述。

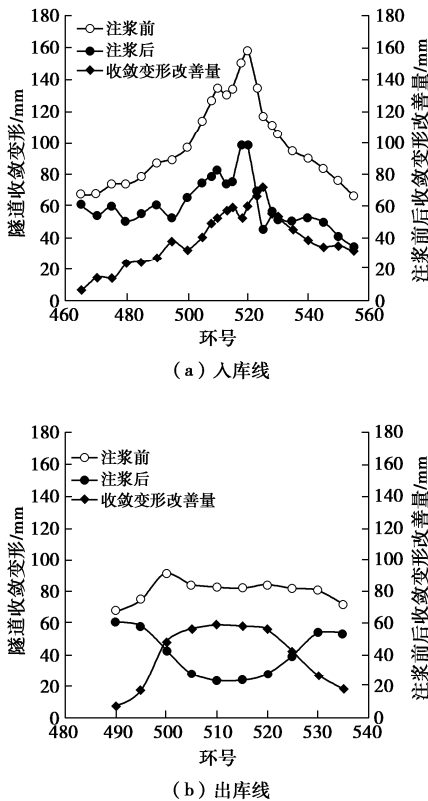
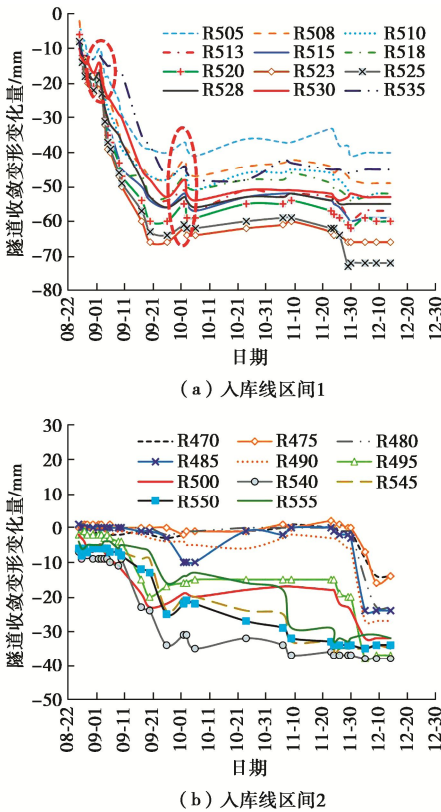


图 12 注浆前后隧道的收敛变形

Fig. 12 Horizontal convergence deformations of tunnel before and after grouting



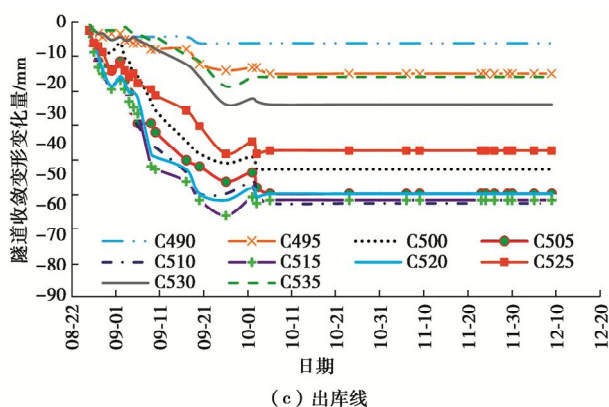


图 13 注浆过程中隧道收敛变形的变化曲线

Fig. 13 Curves of horizontal convergence deformation of tunnel during grouting

根据 Zhang 等^[24]、Liu 等^[25]、Zhao 等^[26]的现场实测数据,在不同的注浆阶段中隧道横截面变化以及收敛变化趋势如图 14 所示。注浆前,由于隧道周围水土压力以及地面堆载的影响,隧道横截面呈现“横鸭蛋”大变形,见图 14 (a);注浆过程中,浆液产生的水平压力使得隧道侧向作用力增加,隧道收敛变形相对初始状态有所减小,隧道横截面尺寸得到一定程度的恢复,见图 14 (b);注浆结束后,随着隧道外超孔隙水压力的消散以及土体的固结,隧道收敛变形有所增加,由于注浆过程对土体的微扰动以及浆液的凝固和硬化,隧道周围土体力学性质得到改善,使得隧道收敛变形不会完全恢复到注浆前的状态,见图 14 (c), (d)。

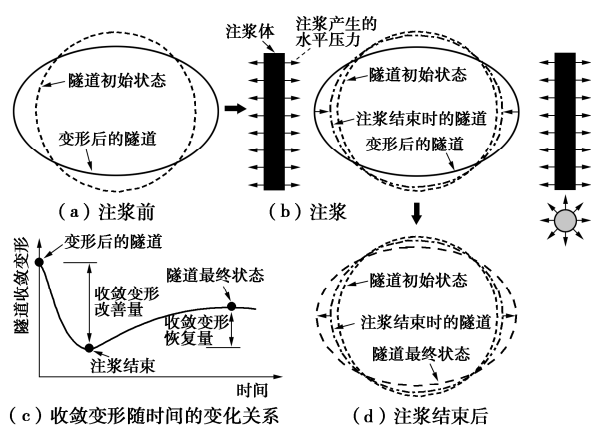


图 14 注浆过程中隧道收敛变形的变化曲线

Fig. 14 Variation curves of tunnel convergence deformation during grouting

Liu 等^[25]、Zhao 等^[26]分别对南京地区注浆微扰动效果进行了详细的实测数据归纳和分析,结果表明注浆结束后隧道收敛变形恢复量约为改善量的 30%。从图 13 中可以看出,本文案例中注浆结束后隧道收敛变形虽然有所恢复,但恢复量不是很明显,原因在于以下 3 个方面:①土层的原因。上海地区和南京地区存

在一定的差异, Zhang 等^[24]对上海地区注浆微扰动效果进行分析,结果表明注浆结束后隧道收敛变形恢复量约为改善量的 15%左右,同样小于 Liu 等^[25]和 Zhao 等^[26]的实测结果。②注浆工艺以及注浆方案。本案例遵循“均匀、少量、多点、多次”的有序可控注浆原则进行,并伴随着重复注浆,这与 Zhao 等^[26]的施工工艺存在明显差异。③道路卸载 EPS 回填以及钢板加固。由于本案例中隧道大变形是隧道正上方道路修筑以及明浜回填引起的,在注浆过程中道路卸载同时进行着,这在一定程度上也能够减小隧道的收敛变形;此外注浆结束后相应管片环立即进行了钢板加固,隧道抵抗变形的能力得到大幅度提高,有效抑制了隧道变形的发展。

3.3 注浆量与隧道收敛变形的关系

通过定量分析注浆量与隧道收敛变形的关系,进一步研究注浆微扰动对隧道变形的改善效果。如图 14 (b) 所示,注浆过程与圆孔扩张比较类似,为方便后续分析,将注浆过程简化为平面应变问题,并假设注浆仅仅引起周围土体产生水平位移、忽略土体可能产生的竖向位移。一般而言,浆液的扩散使注浆孔周围土体同时产生水平向左和向右的位移,但仅仅向着隧道方向的位移将起到改善隧道变形的作用。因此,就每一个注浆孔而言,注浆有效体积 V_g 为单孔注浆量的一半。在假设注浆前后隧道横截面形式均为“横鸭蛋”型的基础上, Zhang 等^[24]认为注浆前后,隧道横截面的体积变化量 V_t 为

$$V_t = \frac{2}{3}(\Delta D_b - \Delta D_a)R \quad (1)$$

式中: ΔD_b 为注浆前隧道的收敛变形; ΔD_a 注浆后隧道的收敛变形,本文定义为注浆刚结束时隧道的收敛变形; R 为隧道半径。需要注意的是,由于现场注浆形成的浆液直径和隧道管片环的长度均为 1.2 m,因此式 (1) 还需要乘以 1.2。

图 15 为有效注浆量与隧道体积变化量的关系,并总结了 Zhao 等^[26]和 Zhang 等^[24]的实测数据。从图 15 中可以看出,有效注浆量与隧道管片环体积变化量之间没有明显的回归关系,总体而言,注浆量越大,管片环的体积变化量越大。定义管片环体积变化量 V_g 与有效注浆量 V_t 之间的比值 V_g/V_t 为注浆有效率。图 16 (a) 表明,入库线隧道的注浆有效率介于 0.026~0.06,平均值为 0.04,与 Zhang 等^[24]的实测结果比较吻合;图 15 (b) 表明,出库线隧道的注浆有效率介于 0.054~0.088,平均值为 0.071, Zhao 等^[26]的实测数据大部分位于这个范围。对比图 15 (a), (b) 可以知道,入库线隧道的注浆有效率小于出库线隧道,原

因在于这两条隧道的初始收敛变形不同。

图4表明,入库线隧道在R500—R530环区间内收敛变形均值约为120 mm (19.4‰),最大值为159 mm (25.6‰),出库线隧道在相应区间内的收敛变形约为60~80 mm (9.6‰~12.9‰),出库线隧道注浆前的收敛变形明显小于入库线。因此,注浆前隧道收敛变形能够影响注浆有效率,通常来讲收敛变形越大,注浆有效率越小。而Zhao等^[26]和Zhang等^[24]提到的案例中(图16),注浆前隧道的收敛变形分别为68~79 mm (10.9‰~12.7‰)和124~186 mm (20‰~30‰),与出库线和入库线隧道比较接近,注浆有效率结果也与出库线和入库线隧道一致,进一步说明了初始收敛变形和注浆有效率的关系。

需要指出的是,由于相关案例的数据总结不多,因此上述规律只是一个初步的结论,精确量化关系尚有待于进一步的验证和改进,特别是有效注浆量和隧道体积变化量之间的定量关系。

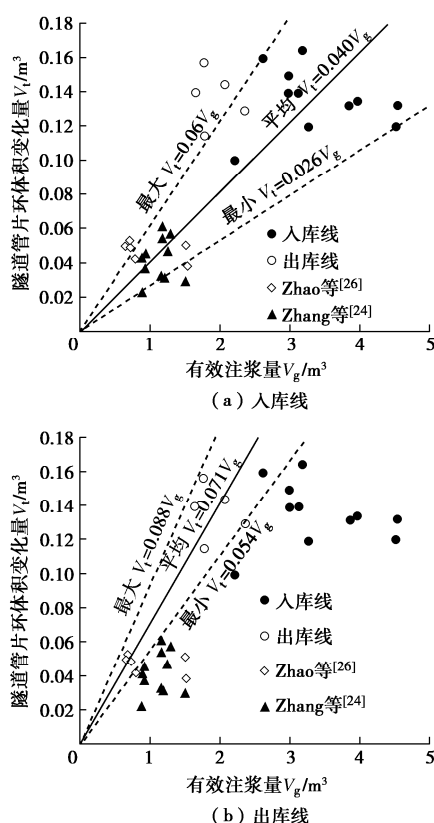


图15 有效注浆量与隧道体积变化量之间的关系

Fig. 15 Relationship between efficient grouting and volume recovery of tunnel

钢板加固后,2021年3月29日重新布置了隧道收敛变形监测点,以2021年3月29日的收敛变形为初值,变形增量如图16所示。钢板加固区间内,入库线和出库线隧道收敛变形增量变化不大,说明钢板加固后隧道的变形已经趋于稳定。

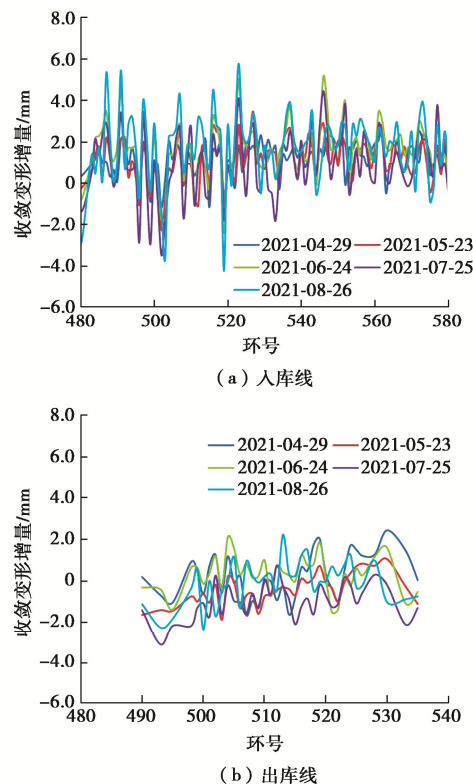


图16 钢板加固后隧道收敛变形的变化曲线

Fig. 16 Curves of horizontal convergence deformation of tunnel after installing steel plates

4 结 论

本文介绍了隧道正上方道路施工对隧道结构变形的影响以及产生的结构病害,并介绍了具体的整治方案,详细分析了侧向微扰动注浆对隧道变形的修复效果,得到以下4点结论。

(1)对于浅埋地铁隧道,道路施工引起隧道横向变形增量约为30~50 mm,局部明浜回填会加剧变形的发展,两者的联合作用对致使隧道最大收敛变形高达159 mm,从而引发各类结构病害,给隧道安全运营带来严重的隐患。因此需要重视此类工程对隧道的影响。

(2)侧向微扰动注浆能够对已发生横向变形的隧道进行变形修复,现场数据表明注浆量与横向变形修复量存在定量关系,并且受注浆前隧道横向变形影响明显。

(3)为控制侧向微扰动注浆引起的隧道水平变形过大,注浆应该沿隧道纵向应采用跳孔注浆的方式,并遵循“均匀、少量、多点、多次”的有序可控注浆原则进行,以实现变形协调。

(4)卸载后采取的EPS换填以及钢板加固在有效地控制隧道变形发展的同时,又能满足工程建设的实际需求。

为了保证地铁隧道的安全运营,对于类似本文涉

及到的工程案例,如何在保证工程正常建设需求的同时,又能保障隧道结构安全,是地铁工作者面临的新挑战。本文的研究工作可以为类似工程中隧道的安全管控提供有益的参考。

参考文献:

- [1] MENG F Y, CHEN R P, XU Y, et al. Contributions to responses of existing tunnel subjected to nearby excavation: a review[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, **119**: 104195.
- [2] ZHANG D M, HUANG Z K, WANG R L, et al. Grouting-based treatment of tunnel settlement: practice in Shanghai[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, **80**: 181-196.
- [3] 范垚垚, 郭晓航, 邓指军, 等. 正上方加卸载对盾构隧道变形的影响分析[J]. *施工技术*, 2014, **43**(7): 107-109. (FAN Yaoyao, GUO Xiaohang, DENG Zhijun, et al. Deformation analysis of shield tunnel with loading and unloading above[J]. *Construction Technology*, 2014, **43**(7): 107-109. (in Chinese))
- [4] HUANG H W, SHAO H, ZHANG D M, et al. Deformational responses of operated shield tunnel to extreme surcharge: a case study[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2017, **13**(3): 345-360.
- [5] 王如路. 上海软土地铁隧道变形影响因素及变形特征分析[J]. *地下工程与隧道*, 2009(1): 1-6, 52. (WANG Rulu. Factors influencing deformation of Shanghai soft soil metro tunnel and deformation analysis[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2009(1): 1-6, 52. (in Chinese))
- [6] SHEN S L, WU H N, CUI Y J, et al. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, **40**: 309-323.
- [7] DI H G, ZHOU S H, GUO P J, et al. Observed long-term differential settlement of metro structures built on soft deposits in the Yangtze River Delta region of China[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, **57**(6): 840-850.
- [8] 郑刚, 潘军, 程雪松, 等. 基坑开挖引起隧道水平变形的被动与注浆主动控制研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(7): 1181-1190. (ZHENG Gang, PAN Jun, CHENG Xuesong, et al. Passive control and active grouting control of horizontal deformation of tunnels induced neighboring excavation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(7): 1181-1190. (in Chinese))
- [9] LIU B, YU Z W, HAN Y H, et al. Analytical solution for the response of an existing tunnel induced by above-crossing shield tunneling[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, **124**: 103624.
- [10] LIANG R Z, XIA T D, HUANG M S, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect[J]. *Computers and Geotechnics*, 2017, **81**: 167-187.
- [11] 魏纲, 洪文强, 魏新江, 等. 基坑开挖引起邻近盾构隧道转动与错台变形计算[J]. *岩土工程学报*, 2019, **41**(7): 1251-1259. (WEI Gang, HONG Wenqiang, WEI Xinjiang, et al. Calculation of rigid body rotation and shearing dislocation deformation of adjacent shield tunnels due to excavation of foundation pits[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, **41**(7): 1251-1259. (in Chinese))
- [12] NG C W W, SHI J W, HONG Y. Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects on an existing tunnel in dry sand[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2013, **50**(8): 874-888.
- [13] 陈仁朋, ASHRAF A M, 孟凡衍. 基坑开挖对旁侧隧道影响及隔断墙作用离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, **40**(增刊 2): 6-11. (CHEN Renpeng, ASHRAF A M, MENG Fanyan. Three-dimensional centrifuge modeling of influence of nearby excavations on existing tunnels and effects of cut-off walls[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, **40**(S2): 6-11. (in Chinese))
- [14] 魏新江, 洪文强, 魏纲, 等. 堆载引起临近地铁隧道的转动与错台变形计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, **37**(5): 1281-1289. (WEI Xinjiang, HONG Wenqiang, WEI Gang, et al. Rotation and shearing dislocation deformation of subway tunnels due to adjacent ground stack load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, **37**(5): 1281-1289. (in Chinese))
- [15] 梁发云, 袁强, 李家平, 等. 堆载作用下土体分层特性对地铁隧道纵向变形的影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, **42**(1): 63-71. (LIANG Fayun, YUAN Qiang, LI Jiaping, et al. Influences of soil characteristics on longitudinal deformation of shield tunnels induced by surface surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(1): 63-71. (in Chinese))
- [16] LIANG F Y, YUAN Q, SONG Z, et al. Longitudinal responses of shield tunnel subjected to surcharge considering dislocation[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 2021, **174**(4): 342-354.
- [17] CHENG H Z, CHEN R P, WU H N, et al. General solutions

- for the longitudinal deformation of shield tunnels with multiple discontinuities in strata[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, **107**: 103652.
- [18] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(6): 1092-1101. (WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(6): 1092-1101. (in Chinese))
- [19] 黄大维, 周顺华, 赖国泉, 等. 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(7): 1173-1181. (HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, LAI Guoquan, et al. Mechanisms and characteristics for deterioration of shield tunnels under surface surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(7): 1173-1181. (in Chinese))
- [20] 梁发云, 方衍其, 袁 强, 等. 软、硬地层中局部堆载对隧道横向变形影响的试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, **49**(3): 322-331, 430. (LIANG Fayun, FANG Yanqi, YUAN Qiang, et al. Experimental study of the influence of surface surcharge on tunnel lateral deformation in soft and hard soil[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, **49**(3): 322-331, 430. (in Chinese))
- [21] 邵 华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(6): 1036-1043. (SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(6): 1036-1043. (in Chinese))
- [22] 闫静雅, 王如路. 上海软土地铁隧道沉降及横向收敛变形的原因分析及典型特征[J]. *自然灾害学报*, 2018, **27**(4): 178-187. (YAN Jingya, WANG Rulu. Cause analysis and typical characteristics of settlement and transverse convergence deformation of metro tunnel in soft ground in Shanghai[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2018, **27**(4): 178-187. (in Chinese))
- [23] LIU X, JIANG Z J, YUAN Y, et al. Experimental investigation of the ultimate bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened by epoxy-bonded steel plates[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, **14**(6): 685-700.
- [24] ZHANG D M, ZHANG D M, SOGA K, et al. Rehabilitation of overdeformed metro tunnel in Shanghai by multiple repair measures[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, **145**(11): 04019101.
- [25] LIU B, ZHANG D W, YANG C, et al. Long-term performance of metro tunnels induced by adjacent large deep excavation and protective measures in Nanjing silty clay[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, **95**: 103147.
- [26] ZHAO T C, HAN T R, WU G, et al. Effects of grouting in reducing excessive tunnel lining deformation: field experiment and numerical modelling using material point method[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, **116**: 104114.