

软土地层地铁盾构隧道管片收敛变形整治方案^{*}

陈春红 周奇辉 邢玉芳 张琼方

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 310014, 杭州//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的:由于外部作业扰动影响,地铁盾构隧道管片易发生横断面收敛变形增大的情况,进而导致管片病害多发,影响地铁运营安全。因此,需针对管片的收敛变形整治措施开展研究。方法:以杭州某地铁区间隧道为例,介绍了其隧道管片收敛变形情况及管片主要病害分布情况;分析了隧道管片横断面收敛变形机理;提出一种隧道管片横断面收敛变形整治方案——MJS(全方位高压喷射)工法桩+微扰动注浆,并分析了所提整治措施的整治效果。结果及结论:所提整治方案对隧道管片收敛变形状况改善较为明显,管片收敛变形整治量基本可以达到10~20 mm,达到管片横断面收敛变形的20%~40%;由于MJS工法桩的隔离作用,整治后管片收敛回弹量较小,基本在5 mm以内,约为收敛整治量的20%;在施工期加强隧道底部注浆能有效防止施工期和后期隧道沉降变形;隧道管片横断面收敛变形整治对隧道的竖向变形和水平变形影响均较小。

关键词 地铁;盾构隧道;软土地层;管片收敛变形

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.033

Improvement Scheme for Metro Shield Tunnel Segment Convergence Deformation in Soft Soil Stratum

CHEN Chunhong, ZHOU Qihui, XING Yufang, ZHANG Qiongfang

Abstract Objective: Due to external operation disturbance, metro shield tunnel segments are prone to increased convergence deformation in the transverse sections, leading to multiple segment defects and compromising metro operation safety. Therefore, it is necessary to research improvement measures for the convergence deformation of tunnel segments. Method: Taking an interval tunnel in Hangzhou Metro as an example, the convergence deformation and distribution of tunnel segment major defects are introduced. The mechanism of tunnel segment transverse section convergence deformation is analyzed. An improvement scheme for transverse section convergence deformation of tunnel segments is proposed, consisting of MJS

(metro jet system) piles and micro-disturbance grouting, and the effectiveness of the proposed improvement measures is evaluated. Result & Conclusion: The proposed improvement scheme significantly improves the convergence deformation condition of tunnel segments, with the improvement amount of segment convergence deformation reaching 10-20 mm, accounting for 20%-40% of the convergence deformation in the segment transverse section. Due to the isolating effect of MJS piles, the segment rebound deformation after improvement is minimal, generally within 5 mm, which is approximately 20% of the convergence improvement amount. Reinforcing the tunnel bottom grouting during construction effectively prevents settlement deformation during and after the construction phase. The influence on tunnel vertical and horizontal deformations is minimal before and after the aforementioned improvement.

Key words metro; shield tunnel; soft soil stratum; segment convergence deformation

Author's address POWERCHINA Huadong Engineer Co., Ltd., 310014, Hangzhou, China

0 引言

软土地层中的地铁盾构隧道在外部作业影响下极易发生管片横断面收敛变形增大,进而导致隧道衬砌管片裂缝增加、螺栓应力屈服、管片接缝张开、渗漏水增加,甚至是衬砌管片掉块等严重危害地铁运营安全的病害。针对以上问题,已有学者开展了多项针对性研究。文献[1-3]通过建立隧道与地层相互作用的模型,分析了地面超载作用时,不同土层条件下隧道管片横断面收敛变形规律和机理,分析了地面超载附加土压力与隧道穿越土层、隧道上覆土层及下卧土层的物理力学性能关系,揭示了软土地区既有盾构隧道在地面超载作用下极易发生变形超限的机理。文献[4]以上海某运营地铁隧道为研究背景,分析了不同样本元素对盾构隧

^{*} 浙江省科技计划项目(2020C01102)

道管片收敛变形的影响规律。文献[5]针对上海软土地层某地铁区间盾构隧道上方突发大量堆载引起的隧道管片结构变形情况(横向收敛变形最大达到了34.5‰倍的隧道外径),研究了采取卸载、芳纶布及钢环结构补强整治措施后,地铁盾构隧道的受力变形规律。

以上文献对隧道管片收敛变形机理研究较多,但对针对性的管片收敛整治措施,尤其是改善隧道管片收敛变形的整治措施研究较少。杭州某地铁区间隧道由于受各种外部作业的影响,隧道管片横断面收敛变形较大、管片病害较多,影响了隧道的管片结构安全和地铁的运营安全。

本文以该区间隧道为例,介绍了隧道管片的病害情况并分析了隧道管片收敛变形的机理,在此基础上,提出一种隧道管片收敛变形的整治方案,即采用隧道外部MJS(全方位高压喷射)工法桩+微扰动注浆措施,对隧道管片横断面收敛变形进行整治,同时对隧道内的病害进行了修补。本文研究可为盾构隧道管片收敛变形机理和整治措施提供理论依据。

1 地铁隧道收敛变形概况

1.1 地铁隧道结构概况

该地铁隧道位于杭州市萧山区,于2012年年底开通运营。盾构区间隧道管片内径为5 500 mm,隧道衬砌管片采用直线环+转弯环进行错缝拼装,壁厚为350 mm,环宽为1.2 m,采用C50混凝土,环向管片间用12个M30螺栓连接,纵向衬砌环间用16个M30螺栓连接。管片外弧侧设弹性密封垫,内弧侧设嵌缝槽。整个环面及分块面密贴,环与环、块与块以弯螺栓连接。环向螺栓、纵向螺栓均采用锌基铬酸盐+抗碱涂层作防腐蚀处理。

1.2 工程地质

该地铁区间隧道所处区域除地面表层有一层2-2粉质黏土层外,其余基本为淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土,淤泥质土层厚约30 m,隧道所处地层均为淤泥质土层。该淤泥质土层具有高压缩性,物理力学性质较差,且为沼气的主要储存层和气源层。隧道上部覆土厚约12 m。土层物理力学参数如表1所示,隧道区域土层分布示意图如图1所示。

表1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the soil layers

土层名称	重度/(kN/m ³)	含水量/%	孔隙比%	液限/%	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
2-2 黏质粉土	19.0	29.5	0.837	30.4	9.71	9.6	26.2
4-2 淤泥质黏土	17.3	45.9	1.311	41.1	2.61	12.6	8.9
6-1 淤泥质粉质黏土	17.3	44.3	1.284	39.8	2.85	13.2	9.5
8-2 淤泥质粉质黏土夹粉砂	17.4	42.2	1.181	36.4	3.50	14.9	12.7

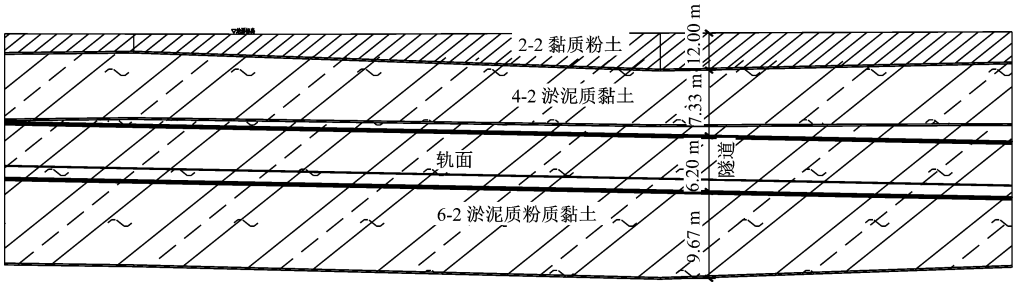


图1 隧道区域土层分布示意图

Fig.1 Diagram of soil layer distribution in tunnel area

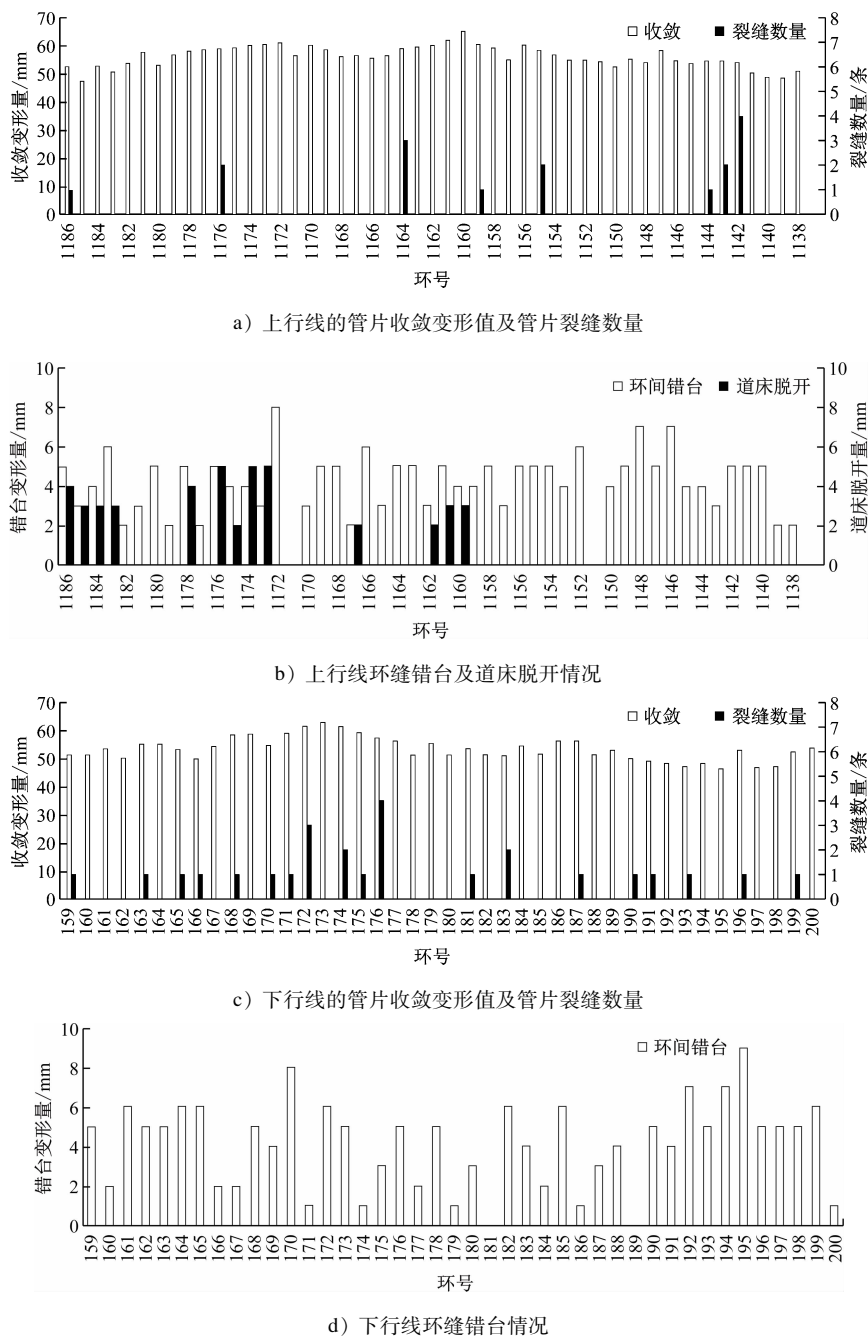
1.3 地铁隧道管片变形情况和病害

隧道横断面管片收敛变形主要集中在上行线第1186环—第1137环、下行线第159环—第200环。管片的收敛变形值为46.7~65.5 mm,收敛变形大多处在50~60 mm范围,收敛变形小于50 mm的管片约占管片总数的10%,收敛变形大于60 mm

的管片约占管片总数的13%。

除隧道管片横断面变形较大外,该范围隧道内管片裂缝主要位于管片拱顶位置,最大裂缝宽度约为0.43 mm,接缝最大张开量约为15 mm,环间错台量最大约为9 mm,上下行线各有两处管片破损和若干渗漏点,上行线局部范围道床脱开。隧道病

害分布情况如图 2 所示。



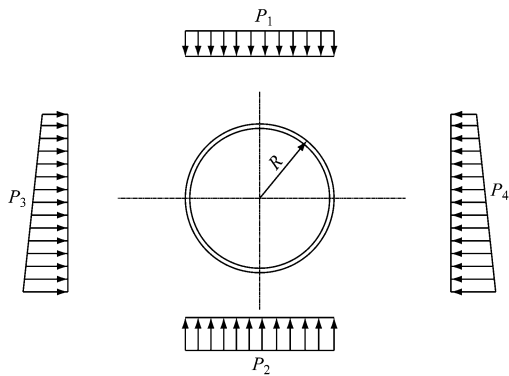
注:上行线中第 1181 环、第 1169 环、第 1167 环、第 1154 环、第 1153 环、第 1142 环、第 1140 环渗漏水,第 1166 环、第 1149 环破损;下行线中第 190 环、第 200 环渗漏水,第 165 环、第 179 环缺损。

图 2 隧道管片病害分布
Fig. 2 Distribution of tunnel segment diseases

2 隧道收敛变形机理分析

软土地层中的盾构隧道外部作用力主要有垂直和水平土压力、外水压力、侧向地层抗力、地层反力、地面超载、施工荷载及地震力等,本文将这些荷

载简化为 4 个方向的作用力($P_1—P_4$),隧道管片受力示意图如图 3 所示。常规情况下 $P_2 > P_3 = P_4 > P_1$,一旦发生地面超载即 P_1 增大,或旁侧卸载 P_3 或 P_4 减小时,就会发生隧道管片横向受力变形增大的情况,即隧道横断面成为“横鸭蛋”状。



注: R 为隧道外径。

图3 隧道管片受力示意图

Fig. 3 Diagram of tunnel segment stress

3 隧道整治方案

当隧道管片发生横断面收敛变形较大时,整治措施通常从两方面着手:①减小上部荷载,即降低 P_1 ;②加大侧向压力,即增大 P_2 。在单独减小 P_1 的情况下,隧道管片和周边土体的应力将会重新分布,隧道管片收敛变形的改善效果并不明显。增大侧向压力对隧道管片收敛变形的改善作用较大,但若隧道管片的收敛变形是由于前期上覆附加荷载增大引起的,只增大侧向压力虽对隧道的收敛变形改善虽有所帮助,但由于隧道管片受压增大,需复核隧道管片结构的受力情况。

目前,增大管片侧向压力常用的方法为微扰动注浆,即通过注浆体填充提高隧道管片两侧的土体强度和土体侧压力,进而改善隧道管片的收敛变形情况。而软土地层中,由于隧道管片结构的刚度远大于周边软土地层,要达到整治目标需要多次注浆,且后期管片收敛变形反弹量较大,整体整治效果不佳。

本文采用 MJS 工法桩 + 微扰动注浆的形式对隧道管片的横断面收敛变形进行整治。隧道两侧各布置一排 $\phi 2\ 400\text{ mm}@1\ 700\text{ mm}$ 的 MJS 工法桩作为隔离结构,桩中心距隧道外侧 1.5 m ,桩顶处于隧道上方 $0.5D$ (D 为隧道洞径)处,桩底至隧道底部下方 $1.0D$ 处。隧道及其上下 $0.5D$ 范围内进行 MJS 半喷。微扰动注浆孔距离隧道外侧 1.2 m ,注浆范围为隧道顶至隧道底部下方 $1.0D$ 处,注浆孔孔距为 1.2 m 。

4 整治方案效果分析

4.1 施工过程

MJS 工法桩于 2020 年 10 月施工完成,于 2021

年 1 月开始微扰动注浆,2021 年 8 月微扰动注浆完成,共历时约 8 个月。注浆时注一跳五(间隔注浆,相邻两次注浆的注浆孔之间应间隔不少于 4 个注浆孔),相邻注浆孔间隔天数不小于 2 d。注浆期进行实时监测,一般于地铁停运后开始注浆,地铁运营恢复前结束注浆,基本注浆时间为晚上 23:00 至次日凌晨 4:00 左右,每 15 min 监测一次数据。注浆压力一般为 $0.3 \sim 0.5\text{ MPa}$ 。注浆点布置示意图如图 4 所示。

根据实时监测,注浆期的隧道管片横断面收敛变形有所减小,单次注浆以管片收敛变形 3 mm 控制,当收敛变形达到 3 mm 即停止注浆。施工期隧道的水平变形和竖向变形均有发生,隧道竖向变形以隆起为主,隧道水平变形方向为背离注浆侧,其变形量较小,一般不超过 2 mm 。

根据实际监测数据,2021-08-03 和 2021-08-05 的隧道管片变形时程曲线图如图 5 所示。由图 5 可知:注浆前期隧道管片变形量较小,基本在 0.5 mm 以内;在注浆 $2 \sim 3\text{ h}$ 后,当注浆量达到一定阈值,隧道管片的收敛变形、竖向变形和水平变形均有一个明显的变化过程,注浆持续 $30 \sim 45\text{ min}$ 后基本就能达到单次注浆的目标值(3 mm);在达到目标值后,进入停止注浆期($2 \sim 3\text{ h}$),隧道变形基本稳定,略有回弹,回弹量在 0.5 mm 以内。注浆期的主要影响区域发生于注浆孔对应环及邻近环(约 $2 \sim 3$ 环)附近,对注浆孔对应环 3 环以外的影响量极小,故注浆基本为一环对应一注浆孔。

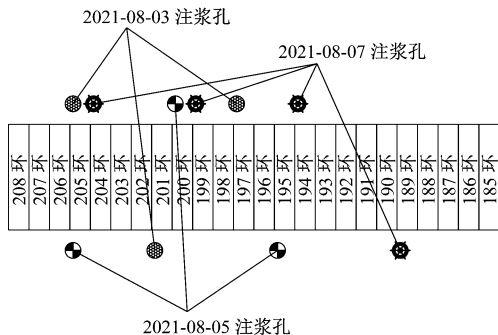


图4 注浆点布置示意图

Fig. 4 Diagram of grouting point layout

4.2 整治效果

上下行线管片的收敛变形量、整治量和回弹量如图 6 所示。根据施工前后的监测结果,隧道管片横断面收敛变形整治效果总结如下:

1) 整治期间,隧道管片收敛变形明显减小,管

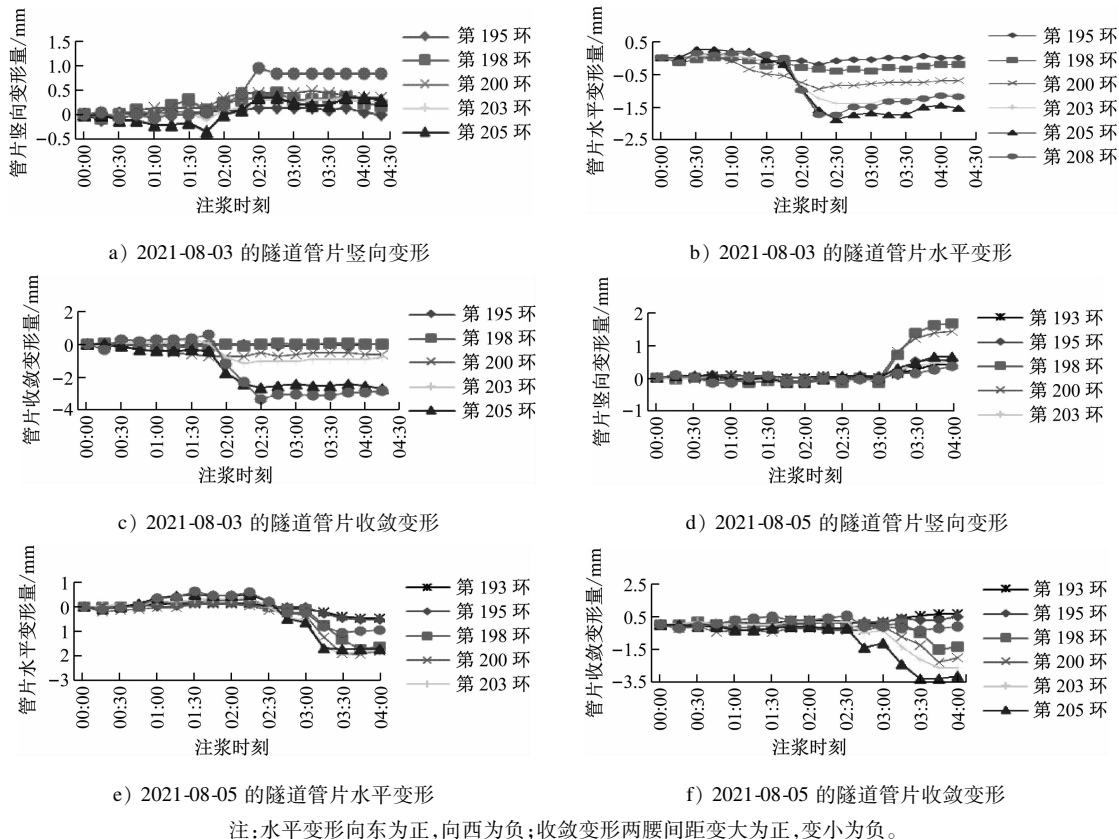


图5 不同日期下隧道管片变形时程曲线图

Fig. 5 Time-history curve diagram of tunnel segment deformation on different dates

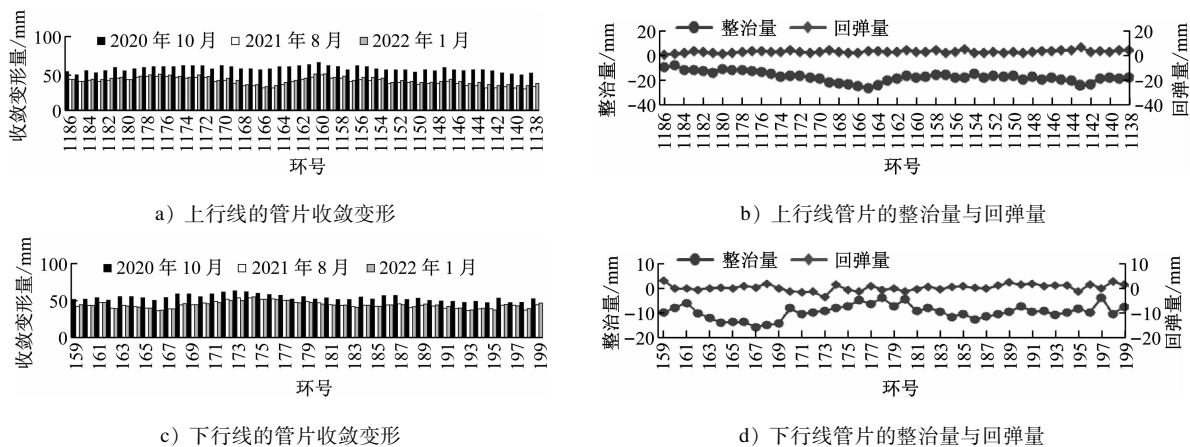


图6 上下行线管片的收敛变形量、整治量和回弹量

Fig. 6 Convergence deformation amount, rectification amount and rebound amount of upward and downward line segments

片的最大整治量达到了 26 mm,大部分管片的整治量基本能达到 5~20 mm,能有效改善隧道的收敛变形状况。隧道横断面收敛变形由原来的 60 mm 左右减小至 50 mm 以内,其横断面收敛减小量最大可达原横断面收敛变形的 46%。

2) 加固完成后,隧道管片收敛变形会有一定的回弹量,收敛变形回弹量约为 0~5 mm,收敛变形

回弹量约为收敛变形整治量的 0~20%。

3) 注浆范围从隧道顶至隧道底部下方 0.5D 处,加固期隧道有一定的隆起量,但隆起量较小,整体加固期的隧道隆起变形约为 5 mm,工后隧道有一定的沉降变形,但最终前期隧道隆起量与后期隧道沉降量基本相同,因此隧道总体的竖向变形量较小。

4) 整治期间,隧道横断面的水平位移有一定的波动,但由于注浆位于隧道两侧,故对隧道水平位移基本无影响。

5 结语

本文详细介绍了隧道管片横断面收敛变形情况及隧道内管片的相应病害,分析了管片横断面收敛变形产生的机理和相应的隧道管片横断面变形整治原理,本文采用 MJS 工法桩 + 微扰动注浆的形式对隧道管片的横断面收敛变形进行整治,主要获得以下结论:

1) 软土地层中,隧道管片的横断面收敛变形主要是由于隧道上方加载或旁侧卸荷引起的,管片横断面收敛变形增大会引起隧道内病害增加,进而影响地铁运营安全,甚至是危害隧道结构安全。

2) 软土地层中,隧道管片横断面收敛变形通常采用隧道上方卸载、隧道侧进行微扰动注浆或结合两种方法同时进行整治,但由于软土地层的特性,其整治效果有限。

3) MJS 工法桩 + 微扰动注浆的形式能在软土层中形成一道隔离墙,从而约束隧道管片收敛整治过程中的注浆体,使注浆过程中的注浆体和注浆压力仅作用在隧道管片外侧一定的范围内,能达到明显的整治效果。收敛变形整治量能达到 10 ~ 20 mm,整治后期管片收敛有一定的回弹,但由于 MJS 桩的隔离作用,回弹量较小,其最大值约为 5 mm。

4) 本文使用的整治方案适用于软土地层中,隧道管片横断面收敛变形较大的盾构隧道,施工时需对称跳孔施工,施工过程中进行实时监测,以控制注浆压力和隧道管片变形量。

5) 注浆加固会增大隧道管片旁侧竖向土压力,进而引起隧道沉降变形,加强隧道底部的注浆能有

效防止施工期和后期隧道的沉降变形。

参考文献

- [1] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 942.
HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Experimental study on influences of surface surcharge on existing shield tunnels buried in soft and hard soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 942.
- [2] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 地表超载作用下软土地区既有盾构隧道与地层的相互作用分析[J]. 铁道学报, 2018, 40(10): 95.
HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Analysis of interaction between existing shield tunnel and stratum under surface surcharge in soft soil region[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(10): 95.
- [3] 黄大维,周顺华,冯青松,等. 地表均布超载作用下软土地区既有盾构隧道对地层相对挤压量的计算方法[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(4): 93.
HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Calculation method for relative extrusion on surrounding ground by existing shield tunnel in soft soil area under uniform surface surcharge load[J]. China Railway Science, 2018, 39(4): 93.
- [4] 邵华,黄宏伟,王如路. 上海运营地铁盾构隧道收敛变形规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(4): 1183.
SHAO Hua, HUANG Hongwei, WANG Rulu. Analysis on convergence deformation law of shield tunnel in Shanghai Metro[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(4): 1183.
- [5] 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.
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.

(收稿日期:2022-06-07)

(上接第 184 页)

绍了其结构组成和功能原理。新型空气停放制动系统解决了弹簧停放制动系统制动力叠加、停放力不足、停放力波动、停放力疲劳衰减、停放制动装置结构复杂、装置体积大和质量大等问题。该系统对提高轨道交通车辆制动系统的安全性、可靠性具有重要的现实意义。

参考文献

- [1] 赵奕. 上海地铁 5 号线车辆停放制动故障分析及处理[J]. 技

术与市场, 2020, 27(2): 64.

ZHAO Yi. Analysis and treatment of parking brake failure of vehicles in Shanghai Metro Line 5[J]. Technology and Market, 2020, 27(2): 64.

- [2] 田洪,赵俊. 和谐机车停放制动原理及安全风险控制策略[J]. 电力机车与城轨车辆, 2019, 42(6): 53.

TIAN Hong, ZHAO Jun. Parking braking principle and safety risk control strategy of harmonious locomotive[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2019, 42(6): 53.

(收稿日期:2021-03-26)