

建筑垃圾回填层地铁隧道暗挖法施工地层变形特性分析

崔巍 孙玮泽

(中交基础设施养护集团有限公司, 100011, 北京)

摘要 [目的] 地铁隧道工程穿越杂填土地层施工的案例越来越多。杂填土地层具有孔隙率高、强度低及易变形等特点, 导致地铁隧道穿越杂填土地层时的地面沉降机理不清, 需要对其地层变形特性进行深入分析。[方法] 以北京地铁 16 号线看丹站—榆树庄站区间暗挖地铁隧道工程为依托, 在简述了该区间工程概况的基础上, 阐述了监测断面(选取了 3 个典型断面)及监测点的布置方案。对 3 个断面上各监测点的监测数据进行分析, 形成了各断面的地面沉降时程曲线及沉降速率时程曲线。进一步计算了 5 个地层损失率取值下断面一的沉降槽曲线, 并将断面一实测地面沉降槽曲线与 3 条理论计算沉降槽曲线进行对比, 进而得到建筑垃圾回填层地铁隧道暗挖法施工地层变形的特性。[结果及结论] 杂填土易发生湿陷沉降, 在地铁施工干扰下地层发生整体沉降, 进而导致地层变形呈现出沉降量大、沉降槽宽等特点。当隧道全断面处于杂填土范围内时, 地层受隧道开挖的扰动程度被放大, 此时采取仰拱下方注浆加固是控制地层沉降的有效措施。

关键词 地铁隧道; 建筑垃圾回填地层; 地层变形; 注浆加固

中图分类号 U456.3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.04.035

Stratum Deformation Characteristics Analysis of Underground-excavated Metro Tunnel in Construction Waste Backfill Layer

CUI Wei, SUN Weize

(CCCC Infrastructure Maintenance Group Co., Ltd., 100011, Beijing, China)

Abstract [Objective] There are more and more cases of metro tunnel engineering crossing through miscellaneous fill strata featured by high porosity, low strength, and easy deformation, resulting in unclear land subsidence mechanism of the above metro tunnel construction, an in-depth analysis on the deformation characteristics of this strata is required. [Method] Leveraging the underground-excavated metro tunnel project at Kandan Sta. to Yushuzhuang Sta. interval on Beijing Subway Line 16, and based on an introductive description of the interval engineering, a layout scheme of monitoring profiles (three typical profiles are selected) and monitoring points is e-

laborated. The monitored data at each measuring point on the three profiles are analyzed, forming the land subsidence time-history curve and the subsidence rate time-history curve for each profile. The subsidence trough curves of profile I under five values of formation loss rate are calculated, and the field-measured land subsidence trough curves of profile I are compared with three theoretically calculated subsidence trough curves. In turn, the characteristics of construction stratum deformation of underground-excavated metro tunnel in construction waste backfill layer are obtained. [Result & Conclusion] The miscellaneous fill is prone to collapsible subsidence, and the stratum can undergo overall subsidence under the disturbance of metro construction, further resulting in stratum deformation characterized by larger subsidence amount and wide subsidence trough. When the tunnel full-profile is within the range of miscellaneous fill, the disturbance degree of stratum by tunnel excavation is amplified, at which point grouting reinforcement under inverted arch is an effective measure to control land subsidence.

Key words metro tunnel; construction waste backfill layer; stratum deformation; grouting reinforcement

随着地铁建设规模不断扩大, 地铁工程遇到的特殊地质也越来越多, 众多国内外学者对此开展了针对性研究。文献[1]依托北京地铁某暗挖车站, 采用现场监测法及数值计算法, 对隧道开挖扰动下的地层沉降规律进行了探讨; 文献[2]以北京某富水砂层大断面暗挖隧道为背景, 分析了隧道施工过程中地层孔隙水压力及沉降的演化过程; 文献[3]以广州地铁某在建双线盾构隧道为背景, 通过数值模拟方法获取了双线隧道施工中的地层沉降规律, 并研究了双线隧道的地面沉降曲线形状; 文献[4]分析了双线暗挖隧道开挖影响下的地面沉降模式, 指出两隧道间距值对施工过程的相互扰动程度有显著影响, 该值会改变地层沉降的模式及规律; 文献[5]建立了考虑隧道轴线倾角的地面变形计算公式, 并通过现场监测验证了其合理性。上述研究表

明,相较于单线隧道,双线隧道施工时地层变形的影响因素较多,地面沉降也更为复杂。

既有研究主要集中对普通单一地层地铁隧道开挖影响下的地层沉降规律进行分析。随着城市地铁工程建设的飞速发展,陆续出现了在建地铁隧道穿越回填地层的案例。文献[6]指出建筑垃圾回填地层严重影响了盾构隧道施工效率,并提出了明挖换填处理技术方案。针对城市回填土隧道区段施工难度大、风险高的特点,文献[7]探讨了相应的施工及监测方案,但未对地层沉降规律进行分析。

综上所述,目前鲜有关于既有暗挖地铁隧道穿越建筑垃圾地层沉降特征的研究,而建筑垃圾地层由于具有密实度低、强度低等特点,在施工干扰下土体易出现大变形、不稳定等现象,给施工安全带来了极大的风险和挑战。基于此,本文以北京地铁 16 号线看丹站—榆树庄站区间(以下简称“看榆区间”)建筑垃圾地层穿越段暗挖隧道工程为依托,对地铁隧道开挖影响下建筑垃圾回填地层的变形特征进行研究,分别对该回填地层的沉降时空特性、沉降速率及沉降槽分布规律进行分析,以期为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 工程简介

北京地铁 16 号线 25 标段(看榆区间暗挖段)左线区间二次衬砌(以下简称“二衬”)的结构净宽度为 5.2 m,净高度为 5.7 m。其右线区间二衬结构的净宽度为 5.4 m,净高度为 5.8 m。暗挖区间隧道的二衬结构厚度为 0.50 m,初期支护(以下简称“初支”)厚度为 0.35 m。隧道设置一道临时仰拱,其厚度为 0.30 m。看榆区间的覆土厚度为 7.2~7.7 m。该区间采用深孔注浆的超前加固措施,其加固范围为初支范围外延 1.5 m 及初支外轮廓内 0.5 m,注浆浆液采用单液水泥浆,按照 12 m 一个循环、2 m 搭接长度的方式进行。该区间先开挖左线上层导洞,待上层导洞开挖超过下台阶 6 m 以上后,再开挖下层导洞。

1.2 水文地质情况

看榆区间沿看丹南路由东向西敷设,该区间明挖段后接 90 m 矿山法暗挖段(暗挖段穿越建筑垃圾坑)。榆树庄站南侧存在大型建筑垃圾坑,该垃圾坑的最大深度约为 25.0 m,局部区域已侵入看丹南路正下方。根据相关地质勘探资料及现场实际情况,本段矿山法区间结构整体大部分位于①杂填土层,局部位于②圆砾卵石层及③卵石层。

2 施工监测布点方案

为保障地铁隧道施工安全,施工过程中对该区间隧道地面沉降进行了监控量测,选取 3 处典型的监测断面(分别命名为断面一、断面二及断面三),每个断面上均设有 13 个监测点,用以对地面变形规律进行分析。3 处断面的位置如图 1 所示。

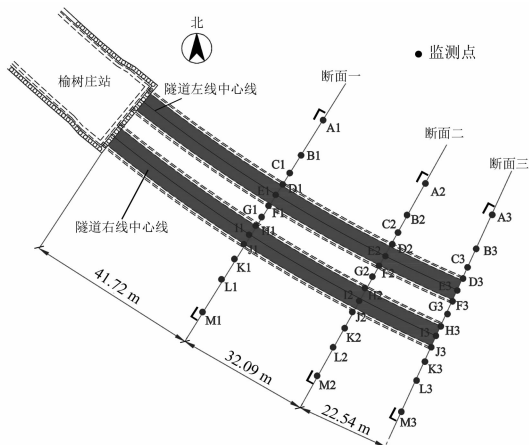


图 1 监测断面及监测点平面布置示意图

Fig. 1 Diagram of monitoring profile and planar layout of monitoring point

图 2 为断面一各监测点立面布置图,断面监测点编号从北向南分别为 A1—M1。断面二、断面三的测点布置情况与断面一相同,其测点从北向南分别为 A2—M2、A3—M3。由图 2 可知:①断面一左右线隧道均位于全断面杂填土层中。该杂填土层厚度为 21.0 m,杂填土与圆砾卵石的界限在区间结构仰拱下 6.0 m 处。②断面二的杂填土层厚度为 15.0 m,其隧道开挖区域位于杂填土层及圆砾卵石层界限处。断面三的杂填土层厚度约为 4.0 m,其隧道开挖区域均位于稳定性较好的卵石层中。

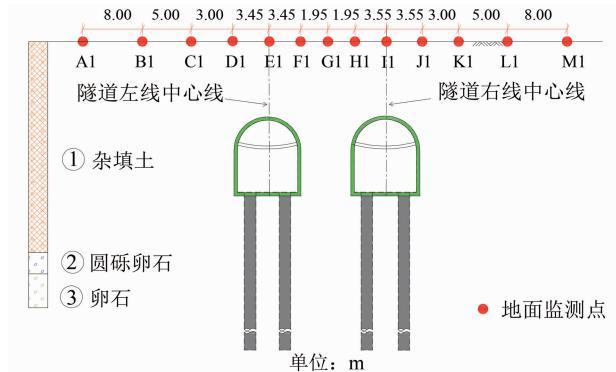


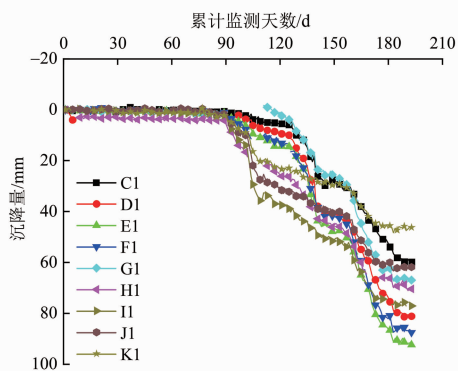
图 2 断面一各监测点立面布置示意图

Fig. 2 Elevation layout diagram of monitoring points on profile I

3 监测结果分析

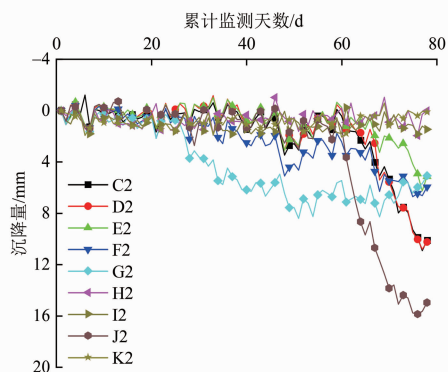
3.1 地面沉降时程曲线特征分析

3 个断面各选取 9 个监测点(分别为 C1—K1、C2—K3、C3—K3)的监测数据进行分析,其地面沉降时程曲线如图 3 所示。



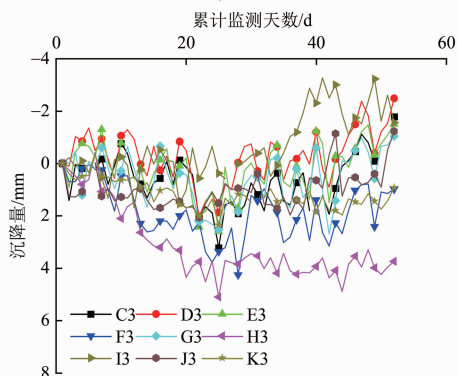
注: 监测起始日为 2018 年 6 月 21 日。

a) 断面一



注: 监测起始日为 2018 年 10 月 22 日。

b) 断面二



注: 监测起始日为 2018 年 11 月 16 日。

c) 断面三

图 3 3 个断面各监测点的地面沉降时程曲线图

Fig. 3 Diagram of land subsidence time-history curves at each monitoring points on three profiles

由图 3 可知:①断面一的累计沉降最大点为 E1

(左线拱顶处),其累计沉降量最大值为 92.50 mm;②断面二的累计沉降最大点为 J2(右线拱顶处),其累计沉降量最大值为 15.88 mm;③断面三的累计沉降最大点为 H3,其累计沉降量最大值仅为 3.75 mm。由此可见,建筑垃圾回填层厚度对地面沉降量影响较大。

3.1.1 断面一的地面沉降情况

由图 3 a)可知:①监测早期各监测点的沉降基本不变,地面沉降量在监测起始日起 90 d 开始缓慢增大;②隧道左线附近测点(H1—K1)的沉降速率明显大于隧道右线附近测点(C1—F1)的沉降速率,隧道右线正上方测点 I1 的沉降速率最大;③随着隧道左线掌子面的推进,C1—F1 的沉降速率增大,在左线开挖扰动下 H1—K1 的沉降量也逐渐增大,但 H1—K1 的沉降速率远小于 C1—F1 的沉降速率;④由于回填地层孔隙率大、稳定性较差,降雨后土层出现了明显的固结现象,导致地面沉降量不断增大,因此施工单位对地层采取了相应的加固措施,在监测起始日起 180 d 后地面沉降速率逐渐降低。

3.1.2 断面二的地面沉降情况

由图 3 b)可知:①由于断面二处开挖断面深孔注浆,随着隧道开挖面的推进,G2(隧道左线中心线和隧道右线中心线连线的中点)的沉降量最为显著;②当隧道左线开挖至断面二时,左线附近地面位移逐渐增大;③由于建筑垃圾回填层的固结,当隧道开挖经过断面二后,断面二的地面沉降量仍持续增大。断面二的地面沉降规律与断面一的地面沉降规律类似,但与断面一相比,断面二的建筑垃圾回填层厚度较小,且隧道开挖下部区域位于卵石地层中,断面二具有更好稳定性,因此,断面二的地层沉降量要远小于断面一。

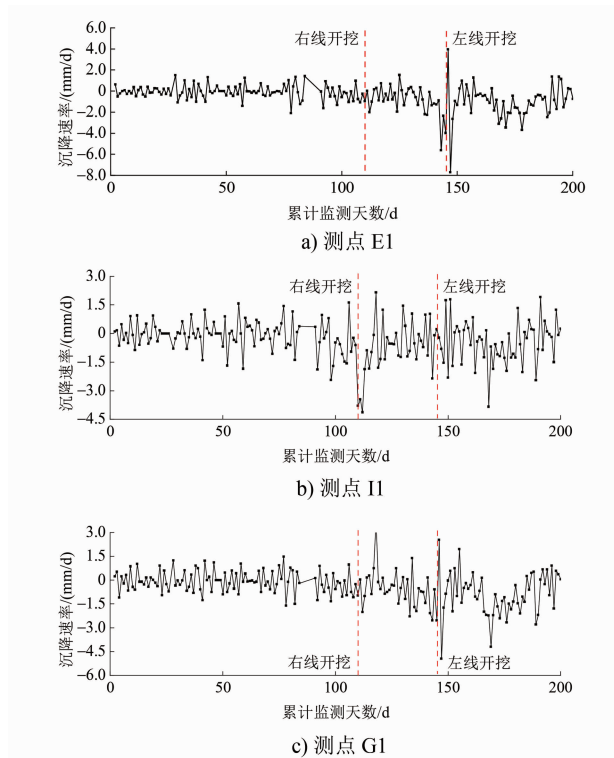
3.1.3 断面三的地面沉降情况

由图 3 c)可知:①在监测起始日起的 30 d 内,由于隧道开挖对地层的扰动,断面三的地面沉降量增大;②断面三的填土层度仅为 4.0 m,且隧道开挖区域位于卵石层,其地层整体性显著高于断面一和断面二;③断面三的地层在注浆压力作用下逐渐抬升,因此部分监测点的沉降量开始减小,且呈抬升趋势;④当隧道全断面处于杂填土范围内时,受降雨后土体固结作用的影响,地面沉降量逐渐增大,进而使得地层因隧道开挖引起的扰动程度被放大。

3.2 地面沉降速率分析

由上文分析可知:断面一的地面沉降量较

大,断面二及断面三的地面沉降量较小。为此,选取断面一的 E1(隧道左线拱顶测点)、I1(隧道右线拱顶测点)及 G1(隧道左线中心线、隧道右线中心线连线的中点),对这 3 个测点的沉降速率作进一步分析,其地面沉降速率时程曲线如图 4 所示。



注:监测起始日为 2018 年 6 月 21 日。

图 4 断面一上 3 个测点的地面沉降速率时程曲线

Fig. 4 Diagram of land subsidence time-history curves at three measuring points of profile I

由图 4 可知:①隧道开挖使得同侧测点的地面沉降速率显著增大;②两侧隧道开挖均会对中间地层的沉降规律产生影响,使 2 条隧道中间地层的变形规律变得复杂;③监测起始日起 150 d 后,测点 E1、测点 G1 及测点 I1 的沉降速率变化规律类似,这说明了左线开挖通过后的地面沉降主要是由于建筑垃圾回填层整体沉降造成的。

3.3 地面沉降槽分析

本工程区间隧道为双向平行隧道。相对于单隧道,双向平行隧道开挖对地面沉降的影响更为复杂。根据既有研究成果,第二条隧道往往是滞后于建设节点,因此产生的地面土体沉降可近似看作 2 条隧道单独施工的叠加。双洞体叠加 Peck 公式如下:

$$S_x = \frac{V}{\sqrt{2\pi i}} e^{-\frac{x^2}{2i^2}} + \frac{V}{\sqrt{2\pi i}} e^{-\frac{(x+d)^2}{2i^2}} \quad (1)$$

$$V = \delta \pi r^2 / 4 \quad (2)$$

$$i = \frac{h}{\sqrt{2\pi}} \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3)$$

式中:

x ——沉降曲线中心到计算点的距离,单位 m;

S_x ——地面 x 位置处的沉降,单位 mm;

V ——隧道单位长度地层体积损失量,单位 m^3/m ;

d ——2 条隧道中心线之间的距离,单位 m;

i ——地面沉降槽宽度,单位 m;

δ ——地层损失率;

r ——隧道半径,单位 m;

h ——隧道埋深,单位 m;

φ ——土体内摩擦角,单位($^\circ$)。

联立式(1)一式(3),可对地面土体沉降进行求解。取 $r=4$ m, $d=10.8$ m, $h=12$ m, $\varphi=10^\circ$ 。 δ 分别取 0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9% 及 1.0%,对 δ 取不同理论值下断面一的沉降槽曲线进行计算分析,其结果如图 5 所示。图 5 中,以 2 条隧道地面中线处的 G1 为坐标原点、以水平右方向为正向。

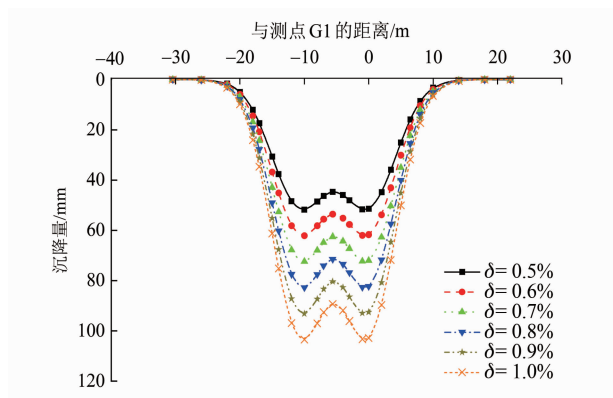


图 5 不同地层损失率(理论值)下断面一的沉降槽曲线

Fig. 5 Subsidence trough curves of profile I under different formation loss rates (theoretical value)

由图 5 可知: δ 取 0.5%、0.6%、0.7%、0.8%、0.9% 及 1.0% 时,对应的地面最大沉降量分别为 51.78 mm、62.14 mm、72.50 mm、82.85 mm、93.21 mm 及 103.57 mm。地面沉降最大值出现在 2 条隧道的中心位置 G1 处。

图 6 为断面一实测地面沉降槽曲线与 3 条理论计算沉降槽曲线(δ 的理论值分别取 0.8%、0.9% 及 1.0%)的对比。

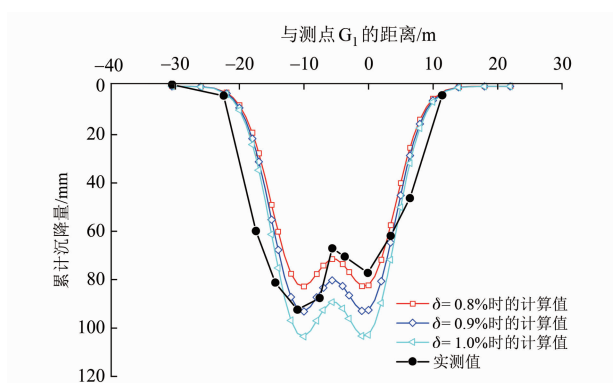


图6 断面一实测地面沉降槽曲线与3条理论计算沉降槽曲线的对比

Fig. 6 Comparison between the measured land subsidence trough curve and three theoretical-calculated subsidence trough curves of profile I

1) 从地面累计沉降量看,实测的地面累计沉降量与 $\delta=0.8\%$ 、 $\delta=0.9\%$ 下计算得到的累计沉降量较匹配。左线实测的沉降值与 $\delta=0.9\%$ 下计算得到的沉降值接近。右线实测的沉降值与 $\delta=0.8\%$ 下计算得到的沉降值接近。此现象产生的原因是理论计算公式未考虑隧道左、右线施工相互扰动的影响。

2) 从沉降槽宽度来看,实测的沉降槽宽度大于理论计算得到的沉降槽宽度。这是由于回填地层具有密度低、稳定性差的特性,导致隧道开挖扰动下回填地层沉降具有横向范围广、竖向沉降大的特点,这也证明了回填地层具有整体沉降的特征。

4 沉降控制措施

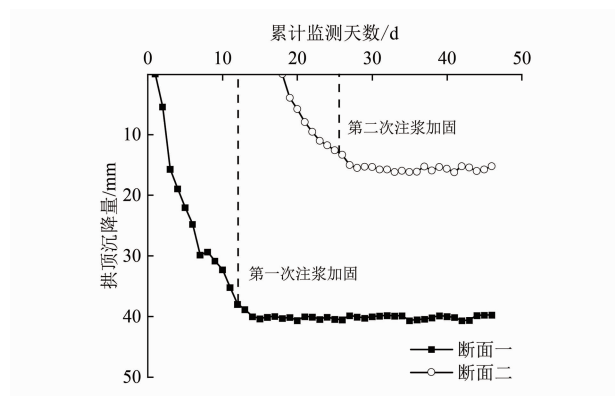
建筑垃圾回填地层沉降显著,影响了隧道施工的安全性。为加强对隧道区间上方地面沉降的控制,本工程对施工辅助措施进行了调整,其具体措施包括:

1) 对区间开挖步序进行了调整。在上层导洞开挖完成后,再进行下层导洞的开挖,并将左右线导洞开挖步距从原方案的15 m增至25 m。

2) 隧道初支时对区间拱部 180° 范围内进行补偿注浆,注浆浆液采用水泥-水玻璃双液浆,加固范围将既有超前注浆范围外扩3 m。注浆后拱顶形成浆脉,浆液充满建筑垃圾空隙,将建筑垃圾凝结成整体。从第一次和第二次循环注浆后的浆脉分布看,浆液随空隙扩散,拱顶加固浆液开挖时已扩散至核心土。

图7为断面一、断面二隧道左线拱顶处的累计沉降曲线。注浆前地层存在整体沉降特征。深孔注

浆后,地层的沉降速率控制在较低水平。可见,建筑垃圾回填层厚度对隧道施工影响下地面沉降速率影响较大,当回填层厚度较大时,普通的拱顶注浆加固措施不能很好地限制地层变形,这导致地层出现了持续的沉降现象。而深孔注浆对于回填层较薄的地层具有较好的加固效果,且能很好地限制地层沉降速率。



注:监测起始日为2018年11月22日。

图7 断面一、断面二隧道左线拱顶处累计沉降曲线时程图
Fig. 7 Time-history diagram of subsidence curves at profile I and profile II tunnel left line vaults

5 结语

1) 建筑垃圾杂填土具有低密实度的特点,易发生湿陷沉降。在地铁隧道暗挖施工影响下,建筑垃圾杂填土存在整体沉降的特征,因此建筑垃圾杂填土地层变形具有沉降量大、沉降槽宽的特点。

2) 建筑垃圾杂填土层厚度对地面沉降规律影响显著。回填层厚度越大,土层的地面沉降量越大、沉降速率快。当隧道全断面处于杂填土范围内时,在降雨固结作用下土层的地面沉降呈逐渐增大现象,这使得地层受隧道开挖的扰动程度被放大。

3) 在地铁结构下方为原状土的情况下,可采取拱顶上方注浆加固方式来改良土层,以降低土层的地面沉降量。当隧道全断面均为建筑垃圾回填土时,由于建筑垃圾回填地层的稳定性差,隧道施工扰动下土层具体整体下沉的特点,此时采取拱顶上方注浆加固的效果不够理想,而采取仰拱下方注浆加固则是控制建筑垃圾地层沉降的有效措施之一。

参考文献

- [1] 刘维宁,沈艳峰,罗富荣. 北京地铁复八线车站施工对环境影响的预测与分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 47.

(下转第195页)

营提供了技术条件,也为两种制式共享同一个场段资源提供了条件。

5 结语

本文提出的复合站台布置形式可为大运量轨道交通系统与中小运量轨道交通系统的衔接提供参考。在城市轨道交通线网规划阶段,应根据客流需求、运营组织设计方案及运营需求,将中小运量有轨电车系统和大运量地铁系统进行融合,在规划层面为该车站型式布局及后期实施预留工程条件。在设计过程中,还应根据有轨电车和地铁的各自特点、工程条件、客流情况等进行综合分析和布局,以较小的工程代价打造轨道交通综合枢纽,实现有轨电车与地铁的无缝衔接。

参考文献

- [1] 邓澄远. 基于运营特点的有轨电车配线设计要点[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12): 148.
DENG Chengyuan. Key points of tram auxiliary line design based on operation characteristics[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25

(12): 148.

- [2] 凌景文. 基于运营经验的地铁配线设置研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 132.
LING Jingwen. Metro auxiliary line setting based on operation experience[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(3): 132.
- [3] 沈景炎. 我国现代有轨电车的发展、标准与规划探讨[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(6): 6.
SHEN Jingyan. Discussion on development, criterion and planning of tram in China[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015, 28(6): 6.
- [4] 杨寿军. 有轨电车站站形布置及站位设置的技术要点[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 128.
YANG Shoujun. Technical key points in station layout and station setting for streetcar[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 128.

· 收稿日期:2022-09-29 修回日期:2022-12-30 出版日期:2024-04-10
Received:2022-09-29 Revised:2022-12-30 Published:2024-04-10
· 作者:张杰,高级工程师,378071500@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第190页)

- LIU Weining, SHEN Yanfeng, LUO Furong. Prediction and analysis of effects during construction of subway station (on Fu-Ba line in Beijing) on environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 47.
- [2] 方江华,姜平伟,郭朋亮,等. 富水砂层大断面暗挖隧道施工地层演化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(20): 8621.
FANG Jianghua, JIANG Pingwei, GUO Pengliang, et al. Stratigraphic evolution of large section bored tunnel construction in water-rich sand layers[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8621.
- [3] 范雨,苏艺,袁勇,等. 复合地层双线地铁隧道施工地表沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊2): 762.
FAN Yu, SU Yi, YUAN Yong, et al. Study on ground settlement law of double-line subway tunnel construction in composite stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S2): 762.
- [4] 廖少明,徐进,孙璟,等. 盾构施工引起的横向沉降模式及其识别[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(4): 777.
LIAO Shaoming, XU Jin, SUN Xun, et al. Ground settlement patterns induced by shield tunneling and its recognition[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(4): 777.

- [5] 赵宗智,孙建平,崔明,等. 考虑盾构隧道轴线倾角的施工地表变形评价[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊1): 46.
ZHAO Zongzhi, SUN Jianping, CUI Ming, et al. Evaluation of surface deformation considering inclination angle of shield tunneling axis[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 46.
- [6] 刘丽花. 建筑垃圾回填区间盾构受阻处理技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2016(3): 26.
LIU Lihua. Disposal technology for shield machine hampered by interval construction waste backfilling[J]. Railway Construction Technology, 2016(3): 26.
- [7] 付文辉. 区间城市隧道人工填土段矿山法施工方案及沉降报警[J]. 企业技术开发, 2016, 35(10): 7.
FU Wenhui. Construction schedule and settlement forecast in city tunnel with mining method[J]. Technological Development of Enterprise, 2016, 35(10): 7.

· 收稿日期:2021-12-07 修回日期:2022-01-04 出版日期:2024-04-10
Received:2021-12-07 Revised:2022-01-04 Published:2024-04-10
· 第一作者:崔巍,高级工程师,24193779@qq.com
通信作者:孙伟泽,高级工程师,7614412@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license