

矿山法地铁区间隧道切桩密接下穿既有地铁车站的施工沉降监测及控制措施

徐 涛

(新疆铁道勘察设计院有限公司, 830011, 乌鲁木齐)

摘 要 [目的] 地铁区间隧道切桩密接下穿既有地铁车站时, 对上部车站变形影响较大, 为了确保施工的安全性, 需要采取有效措施控制地铁车站沉降。[方法] 依托某区间隧道下穿既有地铁车站工程, 建立三维数值模型, 分析不采取沉降控制措施直接切桩下穿时的车站沉降, 研究了增设临时仰拱、错距开挖以及注浆加固等措施的沉降控制效果。提出了多措施组合控制方案, 并采用实测的沉降监测数据验证了组合沉降控制方案的可行性。[结果及结论] 研究表明, 不采用控制措施直接下穿地铁车站时, 车站最大沉降超过规定限值。注浆加固措施的沉降控制效果最优, 沉降减小率为 57.3%; 增设临时仰拱次之, 沉降减小率为 40.4%; 错距开挖效果最差, 沉降减小率为 20.8%。多措施组合施工方案, 可以满足沉降限值。实测的沉降监测数据显示, 多措施组合控制方案能有效控制施工沉降。

关键词 地铁隧道; 下穿; 数值模拟; 地铁车站; 沉降监测
中图分类号 U442.55

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.027

Construction Settlement Monitoring and Control Measures for Mining Method Tunnel Section by Cutting Piles Closely Under-passing Existing Metro Station

XU Tao

(Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., 830011, Urumqi, China)

Abstract [Objective] When the sectional tunnel closely under-passes the existing metro station by cutting piles, it has a significant impact on the deformation of the upper station. In order to ensure the safety of construction, it is necessary to take effective measures to control the settlement of metro station. [Method] Based on the project of a sectional tunnel under-passing the existing metro station, a three-dimensional numerical model is established to analyze the station settlement when being under-passed by cutting piles without settlement control measures. The settlement control effects with measures such as addition of temporary inverted arches, staggered excavation, and grouting reinforcement are studied. A multiple

measure combination control scheme is proposed, and its feasibility is verified by the measured engineering data. [Result & Conclusion] The research results indicate that when the tunnel underpasses the station directly by cutting piles without taking settlement control measures, the maximum settlement of the station will exceed the specified limit. The grouting reinforcement produces the best effect on settlement control with the settlement being reduced by 57.3%. Addition of temporary inverted arches follows next by 40.4%, and staggered excavation has the least effect by 20.8%. The settlement limit can be met by using the multiple measure combination control scheme, which is verified to be feasible by the monitoring data, and can provide reference for similar projects.

Key words metro tunnel; under-passing; numerical simulation; metro station; settlement monitoring

由于地铁区间隧道下穿既有地铁车站的过程中会引起车站既有结构的变形, 导致车站结构开裂, 甚至影响车站的安全运营, 因此下穿既有地铁车站施工过程中的风险控制尤为重要。

我国学者对此进行了相关研究。文献[1]以郑州地铁 12 号线某新建盾构区间隧道下穿既有地铁车站工程为依托, 研究了盾构下穿既有车站的控制技术措施的合理性。文献[2]以暗挖区间隧道下穿地铁车站为工程背景, 发现工作面注浆与全断面深孔注浆的有机结合, 可以有效地促进隧道岩土体的改善, 降低施工对当前既有车站结构的影响。文献[3-4]以工程为基础开展设计分析, 简述工程中存在的作业难点, 提出了关键性作业技术, 开展了模拟分析, 以观察设计效果。文献[5]以换乘车站下穿既有地铁车站工程为背景, 采用有限元数值模拟和实际监测的分析方法, 研究了超大断面暗挖施工对既有车站结构变形特征的影响。以上学者对区间隧道下穿既有地铁车站进行了不同方面的研究, 但是对于区间密接下穿并切车站桩基的研究还较

少,需要针对此种工况进行针对性研究。

新疆地铁某区间隧道下穿既有地铁车站施工时,区间隧道与车站密接,且下穿过程中会截断车站桩基,对车站结构变形影响较大。为了分析切桩密接下穿施工的安全性,本文依托该工程建立三维数值模型,分析了直接下穿时的车站沉降,研究了增设临时仰拱、错距开挖以及注浆加固等措施的沉降控制效果;之后提出了多措施组合控制方案,分析了沉降控制效果;最后采用工程实测数据验证了组合沉降控制方案的可行性,可为类似工程提供参考。

1 工程概况

区间隧道采用矿山法施工,长为 920.35 m,结构覆土约为 19.67 ~ 23.6 m 之间。隧道开挖宽度 6.48 m、高度 6.62 m。图 1 给出了区间隧道与既有地铁车站的空间位置关系图,隧道与既有车站主体结构底板的净距约 0.38 m。由于区间隧道与既有车站密接,隧道穿越过程中会遇到洞桩法车站的桩基,拟采用截断桩基的方法在底部下穿,故需对其可行性进行分析。

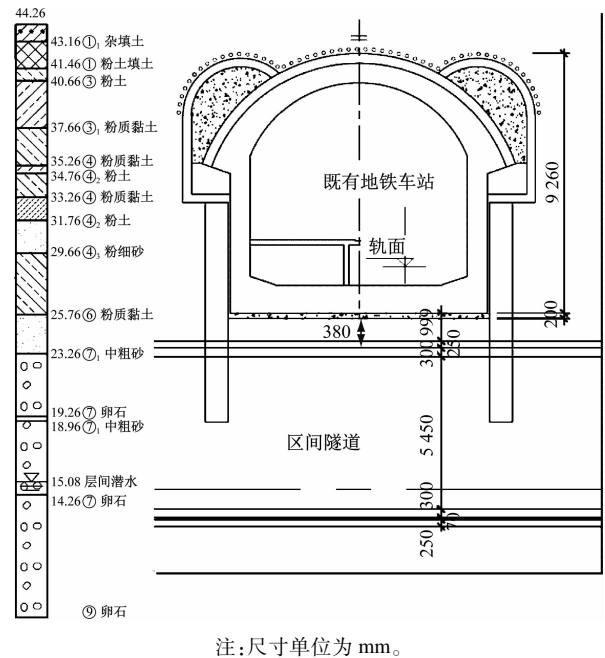


图 1 区间隧道与既有车站空间位置图

Fig. 1 Spatial positions of the section tunnel and the existing station

既有车站单层段顶板位于粉细砂④3 层及粉质黏土⑥层,侧墙位于粉质黏土及中粗砂⑦1 层,底板

位于卵石⑦层。新建区间隧道主要位于卵石⑦层中,层间潜水位位于新建区间隧道结构底板之上 1.7 m 左右。在车站底板处设置了变形监测点,用于实时监测施工过程中车站结构的变形。

2 新建区间隧道密接下穿既有地铁车站施工的沉降模拟分析

2.1 建立数值模型

根据区间隧道下穿既有车站结构的实际工况,采用 MIDAS GTS 软件建立了三维地层结构模型。其中,地层及注浆区采用实体单元模拟,车站桩采用一维量单元模拟,隧道初期支护及临时仰拱采用二维板单元模拟,二衬采用实体单元模拟。地层采用摩尔库伦本构,其他结构均采用弹性本构。地层参数依据地勘资料选取,本构模型具体材料参数见表 1。模型上表面为自由边界,4 个侧面为法向约束,底面为固定约束。模型尺寸为 80 m(长)×60 m(宽)×50 m(高),采用混合网格划分,共划分网格 255 654 个,节点 325 144 个。新建区间隧道外径约为 6.5 m,隧道与车站桩基的位置关系按照实际工况建立,区间隧道与既有车站、桩基的位置关系的数值模型如图 2 所示。采用“杀死”单元的方式模拟开挖,采用参数替换的方式模拟支护。

表 1 本构模型的材料参数

Tab. 1 Material parameters of the constitutive model

地层及本构部件名称	密度/(kg/m ³)	压缩模量/MPa	泊松比	静止土压力系数	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉土填土①	18.0	10.6	0.29	0.40	14	30
粉质黏土③1	19.1	5.9	0.30	0.42	29	13
卵石-圆砾⑦	21.3	19.2	0.20	0.25	17	26
隧道支护	25.0	34 500.0	0.20			
注浆体	25.0	28 000.0	0.20			

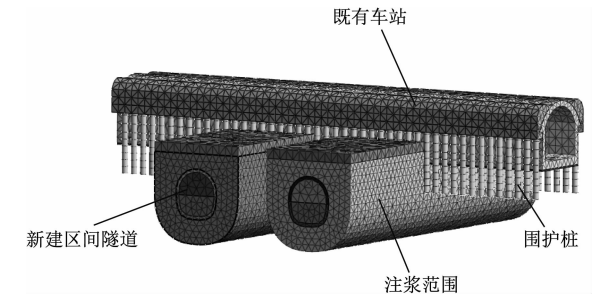


图 2 新建区间隧道与既有车站数值模型

Fig. 2 Numerical model of the newly built tunnel and the existing station

2.2 车站沉降模拟结果分析

为了分析不采用沉降控制措施,直接下穿时的车站变形,模拟了 2 个单线隧道同时推进且台阶法不采用临时仰拱的施工过程,并观察车站底部的变形。结果显示,区间隧道自身沉降大于车站沉降,隧道最大沉降约为 15.90 mm,位于隧道拱顶;隧道底部发生隆起,最大隆起约为 6.46 mm。车站整体发生沉降,两侧沉降较小,中间位置(隧道下穿处)沉降最大,最大沉降约为 12 mm。由此可见,切桩施工以及密接下穿对上部既有车站影响较大。

为了进一步探明车站最大沉降随隧道推进的变化规律,对隧道开挖过程进行了模拟,隧道开挖进尺为 3 m,两边隧道同步开挖,提取每一开挖步中车站结构的最大沉降,如图 3 所示。根据车站沉降变化曲线,可以将整个下穿过程分为 3 个阶段:穿越前、穿越中、穿越后。可以看出,随着隧道开挖的推

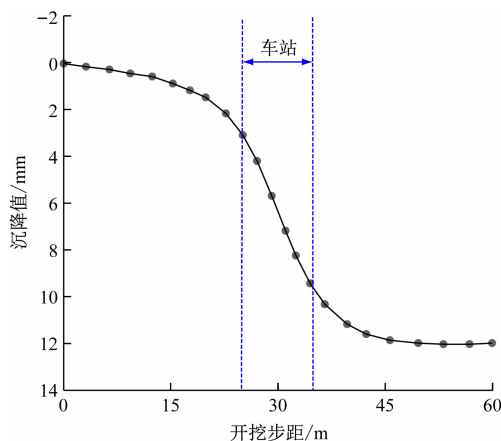


图 3 车站最大沉降值随隧道开挖步距的变化

Fig. 3 Station maximum subsidence changing with tunnel excavation steps

进,车站沉降不断增大。在穿越前,由于隧道开挖面距离车站较远,对车站的影响较小,且随着开挖面接近车站,车站变形速度逐渐增大。在穿越中,车站沉降速度增大,沉降也最大;进入到穿越后,车站沉降速度开始下降,最后趋于平缓,车站变形基本不再发生变化。

根据规定,车站主体结构竖向沉降最终控制值为 3 mm,而不采用控制措施直接进行下穿时最大沉降达到 12 mm,远大于规定值,说明本次切桩密接下穿施工具有一定的施工风险,需采取有效的控制措施以减小车站沉降。

3 车站沉降控制措施及控制效果分析

目前常采用的车站沉降控制措施主要有:下穿隧道增设临时仰拱以确保初期支护及时封闭成环、错距开挖、注浆加固、加强支护强度等措施,但需对其施工参数及沉降控制效果进行分析。

3.1 增加临时仰拱的影响分析

隧道开挖上台阶之后,及时施做临时仰拱可以使上台阶初步闭合,从而达到减小隧道洞周收敛的目的。为了分析施做临时仰拱后沉降减小量,建立了隧道施做临时仰拱的数值模型。图 4 给出了增设临时仰拱后隧道下穿完成时车站的沉降云图,从图 4 中可以看出,增设临时仰拱后车站竖向变形明显减小。其中,车站最大沉降位于隧道上方,沉降值为 7.15 mm,相比于不采取控制措施直接下穿时减小了 4.85 mm(减少 40.4%)。隧道最大沉降位于拱顶,沉降值为 9.74 mm,相比于不采取控制措施减小了 6.16 mm(减少 38.7%)。说明增设临时仰拱可以有效减小隧道及上方车站变形。

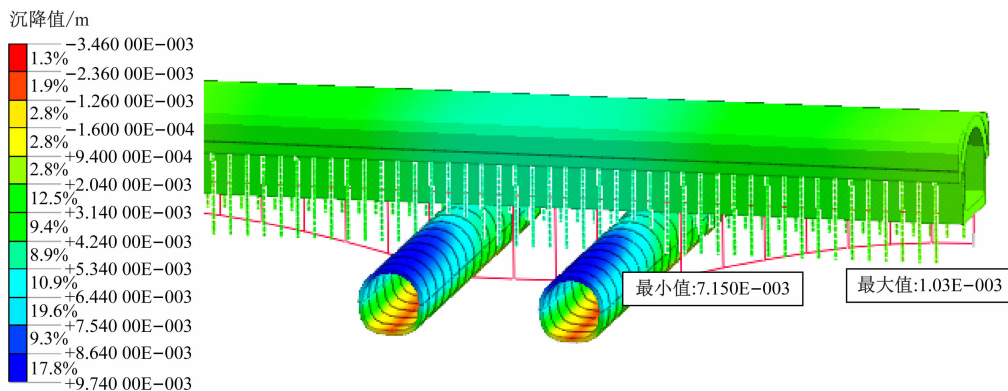


图 4 下穿隧道增设临时仰拱后车站的沉降云图

Fig. 4 Cloud map of the station subsidence after temporary inverted arch being added in the undercrossing tunnel

3.2 错距开挖影响分析

左右线隧道错距开挖时,会减小隧道开挖土体的扰动,从而起到控制车站沉降的作用。为了研究错距开挖对车站变形的影响规律,设置了0 m、5 m、10 m、15 m、20 m、25 m等6种开挖错距工况。

图5给出了开挖错距为25 m时,隧道下穿完成

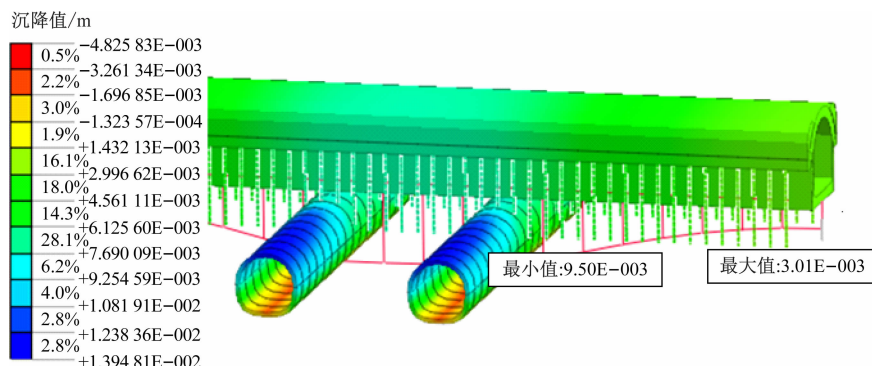


图5 开挖错距25 m时车站的沉降云图

Fig. 5 Station subsidence during excavation with a stagger distance of 25 m

图6给出了车站及隧道沉降随开挖错距的变化规律。可以看出,二者沉降值随开挖错距的增大逐渐减小,但是减小幅度较小。由于开挖错距太大会导致工期增加,且开挖错距大于10 m时对沉降的影响很小。因此,开挖错距选择10 m较为合理。

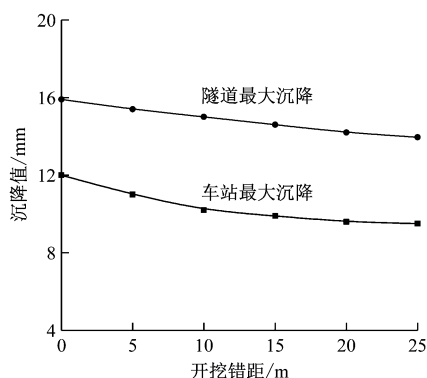


图6 车站和隧道沉降随开挖错距的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of station and tunnel subsidence with stagger excavation distance

3.3 注浆区厚度的影响分析

注浆加固也是控制结构变形的常用措施。为了研究注浆加固对沉降的控制效果,建立了注浆加固隧道施工模型。注浆加固参数主要包括注浆厚度、下穿前注浆长度、下穿后注浆长度等。现分析注浆厚度对沉降的影响,在隧道下穿前、后注浆长度均为10 m的情况下,对注浆厚度设置了1 m、2 m、3 m、4 m、5 m共5种工况。

后车站的沉降云图,可以看出,采用错距开挖后车站沉降有所减小。车站最大沉降值为9.5 mm,减小了2.5 mm(减少20.8%);隧道最大沉降为13.95 mm,减小了1.95(减少10%)。说明错距开挖有助于减小车站沉降,但对隧道自身沉降控制效果较弱。

为了分析不同注浆厚度对车站及隧道沉降的控制效果,改变模型中的注浆厚度进行计算,提取车站及隧道的最大沉降并绘制出变化曲线,如图7所示。可以看出,随着注浆区厚度的增大,车站及隧道的最大沉降值均逐渐减小,且减小速度逐渐变小。当注浆厚度大于3 m时,随着注浆厚度的增大,车站及隧道最大沉降值减小不明显,说明继续增大注浆厚度对沉降控制作用有限,合理的注浆厚度在3 m左右。

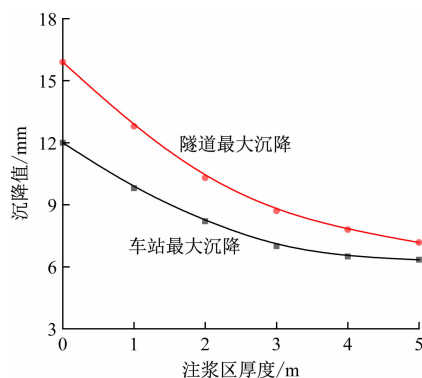


图7 车站和隧道沉降值随注浆区厚度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of station and tunnel subsidence with the grouting area thickness

3.4 下穿前注浆长度影响分析

为了研究下穿前注浆长度对沉降控制的影响,对下穿前注浆长度设置了5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m等6种工况。注浆区厚度为3 m,下穿

后注浆长度固定为 10 m。为了分析车站沉降随隧道下穿前注浆区长度的变化规律,提取各下穿前注浆长度工况的车站及隧道最大沉降值,得到车站及隧道沉降值随下穿前注浆长度的变化规律,如图 8 所示。可以看出,随着注浆长度的增大,车站及隧道沉降值逐渐减小,且注浆长度越短时,注浆长度变化对沉降值的影响越大。这是由于注浆长度越短,注浆区域越靠近车站,对车站变形的影响也越大。当隧道下穿前注浆长度大于 20 m 时,增加注浆区长度对沉降的控制作用不再明显。结果表明,合理的下穿前注浆长度约为 20 m。

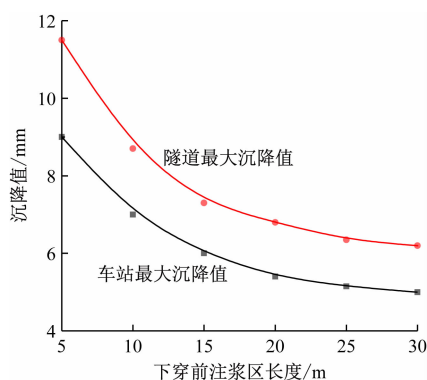


图 8 下穿前车站和隧道沉降值随注浆区长度的变化规律
Fig. 8 Variation law of station and tunnel subsidence with the grouting area length before undercrossing

3.5 下穿后注浆长度影响分析

采用同样的方法研究隧道下穿后注浆长度对车站沉降控制的影响,对下穿后注浆长度同样设置了 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m 共 6 种工况。注浆区厚度为 3 m,下穿前注浆长度固定为 20 m。提取各下穿后注浆长度工况的车站及隧道的最大沉降值,分析车站及隧道沉降值随下穿后注浆长度的变化规律,如图 9 所示。可以看出,随着注浆长度的增大,车站及隧道的沉降值逐渐减小。当下穿后注浆长度小于 10 m 时,注浆长度对沉降值的控制作用较为明显;当注浆长度大于 10 m 时,注浆长度对沉降值的影响越来越小,直至不再影响。结果表明,合理的下穿后注浆长度约为 10 m。

与下穿前注浆长度对比可知,下穿后注浆影响范围较小。这是由于下穿前隧道开挖对前方土体扰动大,从而对车站的影响较大;而下穿后车站在隧道开挖面的后方,开挖面距离车站越来越远,因此对车站的影响也越来越小。

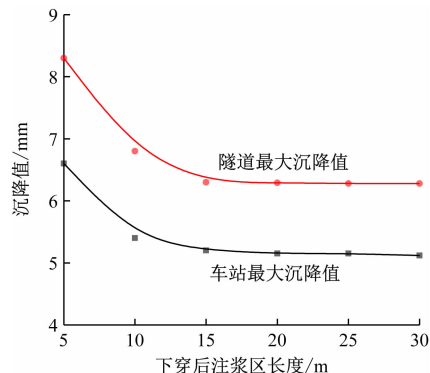


图 9 下穿后车站和隧道沉降值随注浆区长度的变化规律
Fig. 9 Variation law of station and tunnel subsidence with the grouting area length after undercrossing

为了对比各沉降控制措施对沉降值的控制效果,统计出了各沉降控制工况与初始工况(不采取控制措施直接下穿)相比的减小率,详见表 2。从表 2 中可以看出,注浆加固措施沉降控制效果最优,增设临时仰拱次之,错距开挖效果最差。此外,单一控制措施下的车站沉降值均不满足规定限值 3 mm 的要求。为了确保车站沉降值满足控制要求,需采用多措施组合施工。

表 2 不同工况下的沉降情况及沉降值减小率

Tab. 2 Subsidence and subsidence reduction rate under different working conditions

工况	车站沉降值/mm	车站沉降值减小率/%	隧道沉降值/mm	隧道沉降值减小率/%
初始工况	12.00	0	15.90	0
工况 1	7.15	40.4	9.74	38.7
工况 2	9.50	20.8	13.95	10.0
工况 3	5.12	57.3	6.28	60.5

注:工况 1 为增设临时仰拱;工况 2 为开挖错距 25 m;工况 3 为注浆厚度 3 m,下穿前注浆长度 20 m,下穿后注浆长度 10 m。

4 组合措施下的沉降控制效果分析及验证

根据上述各措施控制效果分析可得到合理的处置参数,选择合理的组合处置措施后再分析车站及隧道的沉降控制效果。组合措施为增设临时仰拱、10 m 错距开挖以及注浆加固。其中,注浆加固厚度为 3 m、隧道下穿前注浆长度为 20 m、下穿后注浆长度为 10 m。组合措施下隧道下穿后车站中间沉降最大,最大沉降值为 2.06 mm;车站两侧沉降小,最小沉降值约为 0.65 mm。以上模拟计算表明,已满足车站主体结构竖向沉降最终控制值不大于 3

mm 的要求。

实际施工中也采取了增设临时仰拱、10 m 错距开挖以及注浆加固的组合措施,并在车站底部设置了一系列间隔 5 m 的沉降监测点,共计 13 个。提取隧道下穿后的车站最终的沉降监测值与模拟结果进行对比,如图 10 所示。

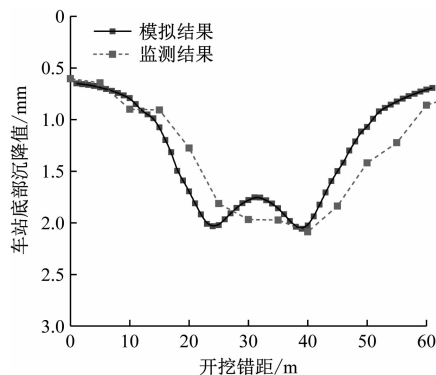


图 10 车站沉降槽曲线对比图

Fig. 10 Comparison graph of station subsidence groove curves

由图 10 可以看出模拟与实测两种方法得到的车站沉降规律基本一致,总体呈现出车站中间沉降值大,两边沉降值小的规律。车站沉降监测值最大为 2.3 mm,也满足施工限值要求,说明本次切桩密接下穿施工的可行性与安全性。而且实际监测结果与模拟结果大小也基本一致,说明了本次模拟的准确性,同时也说明组合处置措施的有效性,可为今后类似工程提供参考。

5 结语

为了分析地铁区间隧道切桩密接下穿既有地铁车站的施工安全性,本文依托某工程实例,建立了三维数值模型,分析直接下穿时的车站沉降值,提出了减小车站沉降值的施工措施,并对其沉降控制效果进行了模拟分析,最后采用工程实测数据验证了组合沉降控制措施的效果。主要得到以下结论:

1) 不采用控制措施,新建区间隧道直接下穿既有地铁车站时,隧道最大沉降值约为 15.90 mm,车站最大沉降值约为 12 mm,超过了规定限值,故需采取有效的控制措施减小车站的沉降。

2) 对比分析了增设临时仰拱、错距开挖以及注

浆加固的沉降控制效果。结果表明,注浆加固措施沉降控制效果最优,增设临时仰拱次之,错距开挖效果最差。

3) 单一沉降控制措施难以保证既有地铁车站沉降值满足规定限值,提出了多措施组合施工方案,模拟计算结果表明,既有地铁车站沉降值最大为 2.06 mm,满足沉降限值的要求,并通过实际施工的监测数据验证了模拟计算结果的准确性,说明了组合处置措施的有效性,可为类似工程提供参考。

参考文献

- [1] 张洁. 区间盾构下穿既有地铁车站变形特征及其控制技术[J]. 科技创新与生产力, 2023, 44(4): 99.
ZHANG Jie. Deformation characteristics and control technology of interval shield tunneling through the existing subway stations[J]. Sci-Tech Innovation and Productivity, 2023, 44(4): 99.
- [2] 杨维威. 暗挖区间隧道下穿既有地铁车站施工技术[J]. 工程机械与维修, 2022(5): 260.
YANG Weiwei. Construction technology of underground excavation interval tunnel passing through existing subway station[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2022(5): 260.
- [3] 邵明秀. 盾构区间近距离下穿既有地铁车站方案设计分析[J]. 工程建设与设计, 2020(19): 120.
SHAO Mingxiu. Design and analysis of shield section passing through existing metro station in short distance[J]. Construction & Design for Engineering, 2020(19): 120.
- [4] 林济. 下穿运营地铁车站的区间隧道冻结暗挖施工数值模拟[J]. 建筑施工, 2020, 42(9): 1736.
LIN Ji. Numerical simulation of frozen underground excavation construction of interval tunnels passing below operated subway station[J]. Building Construction, 2020, 42(9): 1736.
- [5] 郑龙超, 王明胜, 路军富, 等. 新建地铁车站超大断面密接下穿既有车站影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(1): 49.
ZHENG Longchao, WANG Mingsheng, LU Junfu, et al. Influence analysis of newly-built metro station with super-large section underpassing existing station at zero distance[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(1): 49.

· 收稿日期:2023-08-18 修回日期:2023-11-08 出版日期:2024-06-10

Received:2023-08-18 Revised:2023-11-08 Published:2024-06-10

· 作者:徐涛,高级工程师,wuhehe1990@126.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