

既有地铁线上跨基坑管幕 MJS 地基加固施工实例分析

管国春¹,牛自强¹,刘继伟²

(1.中铁十二局集团有限公司,山西 太原 030000; 2.江苏引江建设有限公司,江苏 徐州 221000)

摘要:以徐州新建彭祖大道下方的隧道开挖区间为研究对象,针对徐州的地质条件研究了该地下工程近距离上跨既有运营地铁2号线对2号线的影响,并且采取了管幕加MJS工法联合加固地基的施工方

关键词:近距离上跨;管幕法;MJS工法;监测分析

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)02-0157-05

0 引言

如今,城市轨道交通的建设已经进入飞速发展阶段,在规划和建设新的轨道交通线路时难免会和既有轨道交通线路产生近距离交叉。目前已有许多学者对这种既有运营地铁线路上建设新的轨道交通路线做出了大量研究。例如周朋^[1]研究了在砂卵石复杂地层条件下长沙轨道交通4号线下穿既有2号线的加固方案。刘星^[2]对湖南湘府路市政隧道上跨既有1号线进行了风险评估。胡群芳等^[3]研究了上海地铁M4号线下穿既有M2号线的盾构区间变形。由于不同城市的地质条件不同,盾构隧道穿越既有地铁运营轨道的施工工艺必须因地制宜。在徐州的地质条件下,本文讨论分析了MJS联合管幕法对既有地铁2号线上的基坑加固效果,对以后徐州地区的类似工程有一定的借鉴意义。

1 工程概况

1.1 工程总体情况

本工程为昆仑大道地道上跨轨道交通2号线大龙湖站盾构区间结构,彭祖大道下穿昆仑大道地道,两者平面属斜交(见图1)。昆仑大道地道采用单层双孔箱涵结构,总长约697.5 m,设计宽度28.3 m。其中,跨地铁2号线节点为暗埋段,长度约为399.5 m,

基坑深度约为7 m,基坑坑底(底板底)距离盾构最近处净距约为3 m。轨道交通2号线盾构区间直径为6.2 m,盾构顶标高为31.06 m,盾构间净距约为8 m。

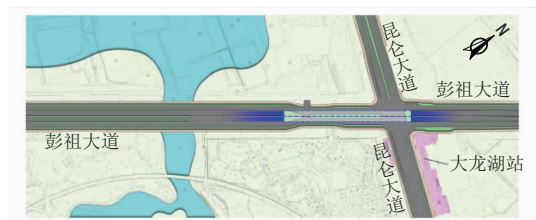


图1 总体布置

1.2 工程地质条件

本场地为黄泛冲积平原地貌单元,地势较平缓,走势呈北高南低状。拟建场地地面标高最大值40.63 m,最小值34.87 m,相对高差为5.76 m。

建筑场地上部以杂填土、素填土、粉土及黏性土为主。场地下伏基岩为寒武系下统馒头组及猴家山组($\in 1\text{ h}+\text{m}$)中风化石灰岩及中风化破碎状石灰岩。

1.3 不良地质条件

(1)根据勘察结果,工程场地范围内灰岩强度较高。根据室内试验资料,中风化破碎状石灰岩及中风化石灰岩层单轴饱和抗压强度分别为5~13 MPa、28~58 MPa,分别属软岩、较硬岩,中风化破碎状石灰岩岩体较破碎,中风化石灰岩局部较破碎,岩溶较为发育,富含基岩裂隙水,对工程建设有较大影响。

(2)根据勘察结果,拟建场地下伏基岩上覆土层为硬塑状黏土,厚约3.00~17.10 m。该层受基岩裂隙水的潜蚀作用,易产生土洞。拟建工程如采用钻孔灌

收稿日期: 2023-02-03

作者简介: 管国春(1978—),男,本科,高级工程师,注册一级建造师,主要从事基础设施项目管理与技术管理工作。

注桩,钻进(冲击)成孔过程中,易发生桩孔偏斜、塌孔、漏浆等成孔事故。因此在钻进过程中,要严格控制钻进速度,并在成孔过程中定时检查和校正。

(3)钻探施工及封孔过程中均未见有岩土层中产生的有害气体,场地内无采空区等其他不良地质作用。

2 管幕 +MJS 联合地基加固施工方案选择

管幕法^[4]是一种主要用于隧道、地铁和机场的暗挖法施工技术。施工中先将管幕的钢管锁口连接,从锁口处注入止水剂或混合砂浆,形成密封的止水管幕。施工过程中有了管幕的保护,就可以对管幕内的土体进行加固,采用边开挖边支护的方式,一直到管幕段整个挖通,再进行结构浇筑。

传统的管幕法大多适用于硬质地层和空间相对较小的地下工程建设,要求地基具有一定的强度和刚度。吴小健等^[5]针对工程的需要提出了大断面多层地下空间的管幕暗挖结构顺作施工工艺,采取跳挖的形式有效改良了管幕下土体的加固方式,并且采用 MJS 工法水平加固地基土,由下到上顺作地下结构。目前,该方法已成功应用到实际工程中并取得了很好的效果。陈帅等^[6]分析了在上海市地铁 14 号线桂桥路站暗挖段中超长距离水平 MJS 工法加固地基的质量,以及影响水平 MJS 工法施工效率的因素。朱雁飞等^[7]以该站的施工过程为研究对象,分析了水平 MJS 工法的钻进精度控制和经过水平 MJS 工法加固后的土体的抗压强度。赵笑鹏^[8]同样以该工程为研究对象,从风险管控的角度分析研究了管幕暗挖法施工过程中管幕的钻进精度、MJS 加固地基内的压力控制效果,以及开挖过程中会遇到坍塌和涌水的风险。以上研究证实,在软土地层中的大断面地下空间进行管幕暗挖法施工的方案是可行的,并且施工的风险是可控的。

2.1 工程实施难点

(1)直接在盾构上方近距离开挖引起的盾构上浮问题。

(2)地下通道结构“减重”对下方盾构抗浮的影响。

2.2 围护结构设计

本基坑安全等级为一级,采用 MJS 及管幕法施工。上跨地铁 2 号线节点基坑采用明挖顺作法施工会减少现有 2 号线隧道拱顶覆土,导致隧道上下应力不平衡,使得 2 号线隧道回弹。因此,需先对既有 2

号线隧道拱顶上方及侧壁的土体进行预加固。“MJS 加固 + 管幕”保护方案采用在 2 号线隧道两侧施作数排抗拔桩,并在开挖范围内施加加固及管幕;在彭祖大道地道开挖时,采用分段开挖,将同一排抗拔桩采用板连成整体,形成刚度较大的板凳桩,从而可抵抗开挖土体产生的回弹。上跨地铁节点基坑支护横剖面见图 2。

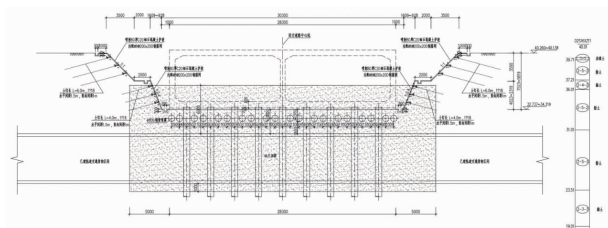


图 2 上跨地铁节点基坑支护横剖面

根据工程筹划,先施工上跨节点东西两侧基坑,后施工上跨节点基坑。在彭祖大道地道开挖影响段,沿既有 2 号线区间盾构隧道纵向进行预加固,纵向(东西方向)施作范围为地道基坑范围内。预加固方案采用 MJS 旋喷桩工法加固,加固体竖向范围为拱顶以上约 5 ~ 6 m,两侧加固至隧道洞腰,东西向两侧加固范围为轨交区间两侧 5.0 m。加固体距既有隧道保持 1m(水平)及 0.5 ~ 1 m(竖向)的安全距离,构成“门”式加固体,避免加固时损伤现有管片结构。加固体内同时设置钢管幕,确保盾构安全。

2.3 基坑开挖顺序

基坑的施工工况主要分为以下阶段(见图 3):

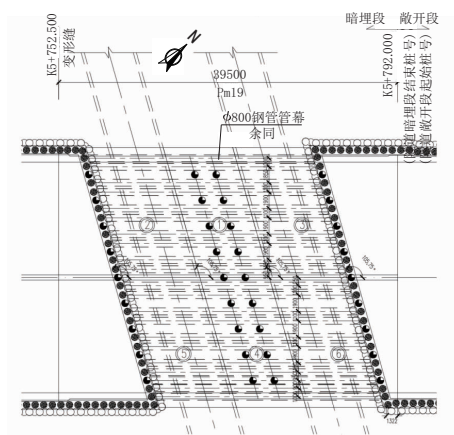


图 3 基坑施工工序

(1)同步实施上跨节点东西两侧基坑的钻孔灌注桩及盾构范围内 MJS 加固与抗拔桩。

(2)基坑降水至坑底以下 0.5 ~ 1 m,开挖东西两侧基坑并施工底板至管幕下,施工管幕。

(3)管幕施工完成后,回筑东西两侧内部结构。开挖区间基坑①区域土体至基坑底,及时回筑该部分垫层及底板,确保抗拔桩与底板可靠连接。

(4)待底板达到强度后配重,确保管幕与配重共同承担盾构区间向上反力。

(5)开挖②区域土体至坑底,及时施工垫层及底板,配重。凿除先施工西侧钻孔桩封堵墙,底板与预留部分抗拔桩连接。

(6)开挖③区域土体至坑底,及时施工垫层及底板,配重。凿除先施工东侧钻孔桩封堵墙,底板与预留部分抗拔桩连接。

(7)同理,施工④~⑥区域结构。结构达到设计强度后,上跨节点覆土至设计地面。

3 数值模拟分析

3.1 分析方法选择

常规基坑开挖引起的地层回弹量一般采用规范推荐的各向同性均质线性变形体理论,计算每层土体的沉降或回弹量,然后分层总和得出地层总的沉降或回弹量。基坑支护结构设计一般采用规范推荐的平面竖向弹性地基梁法及三维弹性地基板法。而本文重点研究内容为基坑开挖卸荷对盾构隧道的影响,并同时考虑相关工程措施对区间隧道变形的控制作用。因此,上述两种常规分析方法在分析环境效应时存在一定的局限性。

本文在基坑稳定性分析的基础上,有必要采用连续介质有限元法进行进一步的分析研究。该方法能将基坑围护结构、周边一定影响范围内的土体,以及某些重要建(构)筑物作为整体进行分析,以开挖面上土体应力的释放作为开挖阶段的荷载,实现施工过程的空间问题的动态分析。

3.2 相关基本假定

有限元法一般基于原型,但又不同于原型。在遵循连续介质力学基本理论的基础上,对原型做一些假定,剔除次要因素,分析主要因素,提高分析的精度与效率。本次模拟分析的基本假定如下:

(1)假设区间与周围土体是位移相容的。盾构区间局部刚度远大于周围地层刚度,但是对于柔性衬砌而言,盾构区间的线刚度相对较小,与周围地层基本接近。工程实践表明,在小变形范围内,盾构区间位移与周围土体位移基本一致,满足小应变变形协调基本假定。

(2)为提高计算效率,定义盾构区间左右线相互平行,并且与上部基坑正交。

3.3 数值分析模型

围护桩、加固土体及内部结构的基本参数见表 1。

表 1 土层和结构基本参数						
编号	项目	弹性模量 E_0 /MPa	γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	c /kPa	$\varphi/(^\circ)$
1	加固土	3 450	22	0.25	45	35
2	盾构隧道	34 500	25	0.2	—	—
3	主体结构	32 500	25	0.2	—	—
4	围护结构	30 000	25	0.2	—	—

计算模型尺寸 100 m×100 m×40 m,包括 3D 实体单元和 2D 析取单元。其中,土体、抗拔桩建模采用 3D 实体单元,地铁管片、基坑底板和坑底管幕(按刚度等效成钢板)建模采用 2D 析取单元。由于基坑底部土层主要为粉土和粉质黏土,土层强度低,压缩性高,对基坑开挖及既有地铁的变形控制不利,考虑在坑底采用 MJS 工法进行门式加固。因此,在有限元模型中对土层参数进行适当加强。模型边界条件为地表自由、四边法向约束、底部法向约束。

数值计算模型主要考虑两种工况:既有地铁 2 号线上基坑施工采用铺设管幕来进行预加固的措施和不铺设管幕。同时,每个工况都进行了一级放坡开挖和施作基坑底板两次数值模拟实验。基坑开挖考虑坑内降水,降至基坑底下 0.5 m。

根据上述工况的设置,对周边环境进行了整体建模分析。相关的地层及结构模型见图 4。

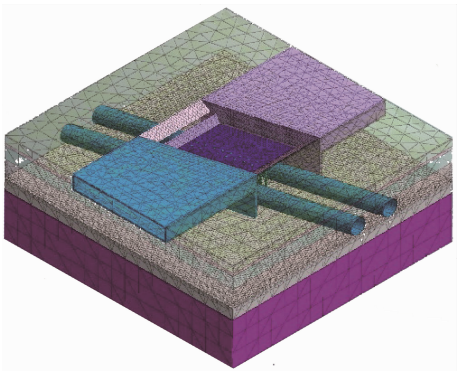


图 4 地层模型

3.4 数值计算结果分析

3.4.1 铺设管幕的数值模拟结果

通过有限元分析结果得知,在一级放坡阶段,采用管幕+MJS 联合的方法加固地基,在工程施工完成后,盾构区间的上浮变形约为 3.92 mm;在施工至基坑底部时,盾构区间的上浮变形约为 6.61 mm(见图 5、图 6)。这两种工况所得出的数值模拟结果均满足相关规范的要求,保证了既有 2 号线的安全。

3.4.2 未铺设管幕的数值模拟结果

通过有限元分析结果得知,若仅通过 MJS 工法

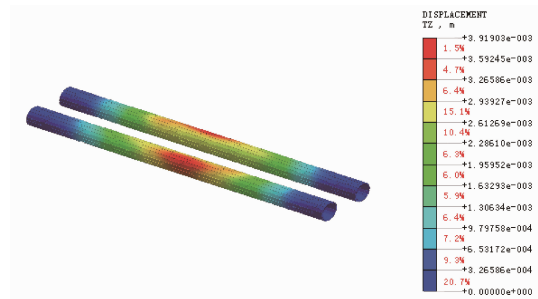


图 5 铺设管幕一级放坡开挖阶段地铁盾构竖向变形

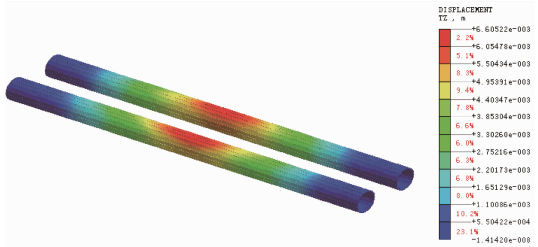


图 6 铺设管幕施作基坑底板阶段地铁盾构竖向变形

而不设管幕来加固地基,在一级放坡阶段,盾构区间上浮变形的数值约为 6.45 mm;在施工至基坑底部时,盾构区间上浮变形的数值约为 12.56 mm(见图 7、图 8)。不难看出,未铺设管幕时的盾构区间的上浮变形值均大于铺设管幕时的盾构区间的上浮变形值。尽管仅通过 MJS 工法加固地基也可以实施,并且数值模拟的结果也在可控范围内,但是仅采用单一 MJS 法,会导致基坑分段较多,施工周期长。而 MJS 和管幕的联合法可以将对既有 2 号线的影响降低到一个相对更小的范围,并且缩短了施工周期,更好地保障了施工安全。

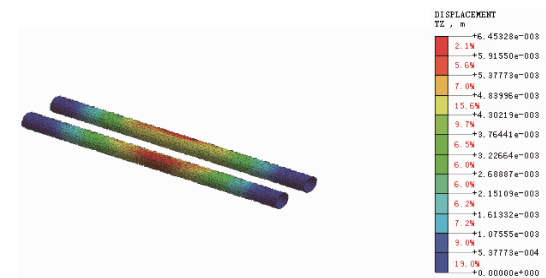


图 7 未铺设管幕一级放坡开挖阶段地铁盾构竖向变形

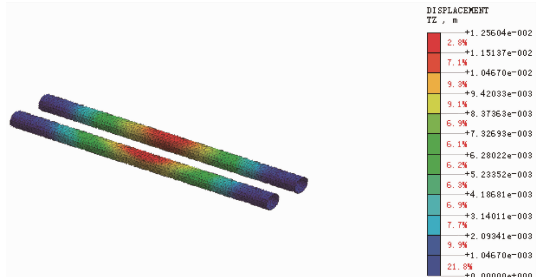


图 8 未铺设管幕施作基坑底板阶段地铁盾构竖向变形

4 基坑开挖过程对既有隧道的影响监测

4.1 监测内容

基坑开挖过程中,为及时掌握围护结构与周边

建筑情况并保证基坑安全,需对地表沉降、地下水位、周边地下管线位移、周边建(构)筑物的沉降和倾斜等进行监测。其主要监测内容和报警值为:

坑外地表沉降:周边地表沉降 $1.5‰H$,速率 2 mm/d(连续 2 d)。同时对轨道交通盾构区间进行严格监测。监测方案见图 9。

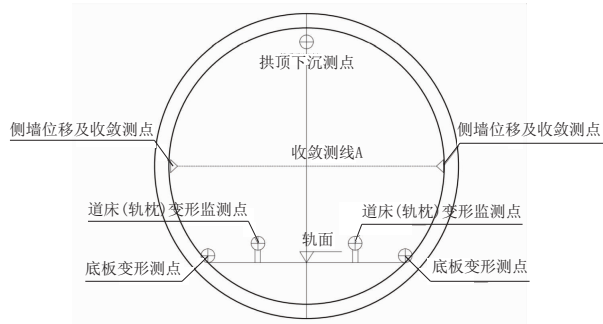


图 9 地铁盾构监测方案

4.2 监测频率和周期

根据《建筑基坑工程监测技术规范》(GB 50497—2019)及设计文件监测要求,结合本工程的监测对象,监测频率详见表 2。

表 2 监测频率

基坑开挖深度	监测频率	底板浇筑后时间	监测频率
≤5 m	1 次 / 2 d	≤7	2 次 / 1 d
5~10 m	1 次 / 1 d	7~14	1 次 / 1 d
>10 m	2 次 / 1 d	14~28	1 次 / 2 d
—	—	>28	1 次 / 3 d

4.3 监测控制指标

根据工程设计要求、变形监测的相关规范,以及周边环境中被保护对象的控制要求,综合确定本工程监测预警值见表 3。

表 3 监测项目控制

盾构隧道变形	盾构隧道裂缝
± 10 mm	± 10 mm
± 3 mm/d	± 3 mm/d

4.4 静力水准监测数据

本工程的静力水准监测点共 28 个。自 2020 年 6 月 1 日起测至 2020 年 12 月 28 日,以 10 d 为一个周期进行地表沉降的数据监测,变化曲线见图 10。

根据图 10 可知,28 个静力水准监测点中数值变化幅度最大的是 JL-02-06 号测点,数值变化量介于 -2.163 7~4.966 9 mm 之间,变化速率介于 0.067 4~2.882 2 mm/d 之间(超过 2 mm/d 的速率只出现了一次),小于警戒值。

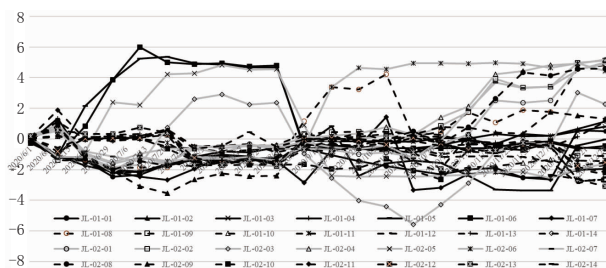
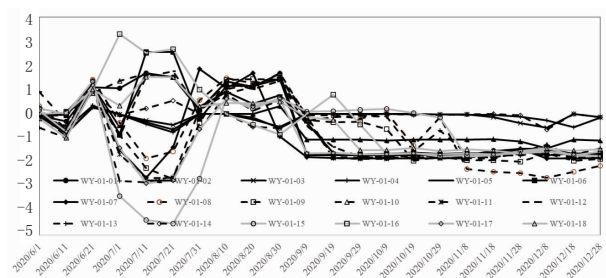


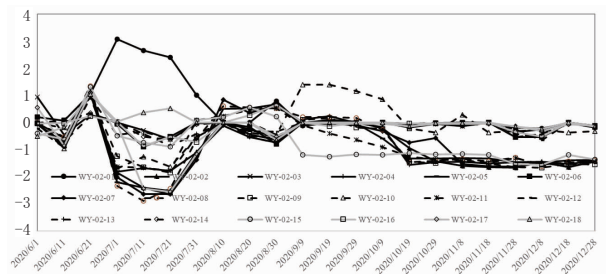
图 10 静力水准变化曲线

4.5 位移监测数据

本工程位移监测点共 36 个。自 2020 年 6 月 1 日起测至 2020 年 12 月 28 日,以 10 d 为一个周期进行既有地铁 2 号线的隧道变形位移监测,变化曲线见图 11。



(a) 位移变化曲线一



(b) 位移变化曲线二

图 11 位移变化曲线

根据图 11 可知,36 个位移监测点中,数值变化幅度最大的是 WY-01-15 号测点,位移值变化量介于 $-4.5296 \sim 1.3657$ mm 之间,变化速率介于 $0.0672 \sim 2.0237$ mm/d 之间,小于警戒值。

4.6 监测数据结论分析

从监测的曲线形态可以看出,随着基坑开挖深度的增加,静力水准和既有 2 号线隧道的位移的变化量也在增加,增加速率趋于稳定,均在可控范围。其余各监测点均显示正常,主体结构浇筑完成后,各

监测点位变化速率较小。因此,既有地铁 2 号线隧道监测点变化符合变化规律,监测结果与施工工况、土质状况基本吻合,监测工作起到了预测作用。

5 结 论

(1)在铺设管幕和未铺设管幕两种施工方法下对一级放坡和施工至基坑底部两种工况进行有限元分析。结果显示,铺设管幕的基坑变形数值和既有 2 号线的变形数值均小于未铺设管幕时的数值,说明管幕联合 MJS 工法加固地基可有效地保护既有地铁运营 2 号线和控制地表的沉降,确保了施工的安全开展。

(2)根据监测数据显示,施工场地的地表沉降数值介于 $-5.9968 \sim 4.2946$ mm 之间,并且不属于同一测点,均小于警戒值,测点的变化也符合规律。既有 2 号线的变形数值介于 $-4.5296 \sim 3.2954$ mm 之间,也不属于同一测点,均小于警戒值,测点的变化也符合规律。这证实了管幕联合 MJS 工法加固地基,在徐州的地质条件下能够有效地控制施工场地及周边区域的地表沉降,可以很好地保护既有地铁运营 2 号线。

参考文献:

- [1] 周朋.MJS 工法在砂卵石地层盾构近距离下穿运营地铁隧道的应用[J].都市轨道交通,2018,31(6):122-128.
- [2] 刘星.上跨轨道交通盾构区间的隧道工程施工风险及控制研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [3] 胡群芳,黄宏伟.盾构下穿越已运营隧道施工检测与技术分析[J].岩土工程学报,2006,28(1):42-47.
- [4] 张建成.隧道下穿综合管沟方案设计[J].低温建筑技术,2014,36(7):116-118.
- [5] 吴小建,张阿晋.大断面多层地下空间的管幕暗挖结构顺作施工工艺[J].建筑施工,2017,39(12):1743-1745.
- [6] 陈帅,梁捷.超长距离水平 MJS 地基加固施工实例分析[J].城市道桥与防洪,2020(9):157-161,174.
- [7] 朱雁飞,郭彦,等.自由断面管幕法建造大型地下结构试验性工程的进展[J].隧道与轨道交通,2019(S2):66-71,84.
- [8] 赵笑鹏.饱和软土地层管幕暗挖法施工风险及对策研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(10):1533-1539.