

西安某地铁车站洞桩法施工的地表变形 规律数值模拟分析*

杨 锋

(中铁十五局集团有限公司, 200070, 上海//高级工程师)

摘 要 以西安某地铁车站为例,采用PBA(洞桩)法暗挖施工,通过FLAC软件的数值模拟与现场监测相结合的方法研究了车站施工诱发的地表沉降与边桩变形的规律。研究表明:①地表沉降曲线沿车站中线对称分布,地表沉降变化的主要影响区域在距车站中线20 m的范围内,最终地表沉降最大值为50.45 mm;车站整体施工中,地表沉降累计变化速率呈现先增加后平缓、再增加最后平缓的现象;②边桩水平位移最大值为16.89 mm,位于边桩中上部位置,越接近桩底,边桩水平位移越小;③边桩主要承受轴向压力,应力值随时间经历了“平缓、加速,再平缓、加速增加”的过程;背土侧轴向钢筋为受拉状态,仅在桩底偶尔会出现受压情况;迎土侧、中性面轴向钢筋为受压状态。FLAC软件数值模拟的结果与现场实测的结果基本吻合。

关键词 暗挖车站;洞桩法;地表变形

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.12.009

Numerical Simulation Analysis of Surface Deformation Law in Certain Xi'an Metro Station with PBA Construction

YANG Feng

Abstract Taking certain Xi'an metro station constructed by PBA method as example, the law of ground surface subsidence and side pile deformation induced by station construction is studied by the combination of FLAC numerical simulation and field monitoring. Research results show that: ① The surface subsidence curve is symmetrically distributed along the center line of the station, and the main affected area is within 20m of the center line of the station. The final maximum surface subsidence value is 50.45 mm. During the overall construction of the station, the cumulative change rate of surface subsidence variation rate experiences increase first, then gentle, and then increase again and finally gentle. ② The maximum horizontal displacement value of the side pile is 16.89mm, located in the

middle and upper part of the side pile. The closer it is to the pile bottom, the smaller the horizontal displacement of the side pile is. ③ The side pile is mainly subjected to axial pressure, and the stress value experiences a process of "gentle and accelerated, and then gentle and accelerated increase" over time. The axial reinforcement at the side of the back soil is in the state of tension, and there is only occasional compression at the bottom of the pile. The axial reinforcement on the side facing the soil and the neutral surface is in the state of compression. The results of FLAC numerical simulation are in good agreement with those of field measurement.

Key words underground excavation station; PBA method; surface deformation

Author's address China Railway 15th Bureau Group Co., Ltd., 200070, Shanghai, China

为适应复杂条件下城市地铁车站施工地表变形需严格控制的要求,PBA(洞桩)法施工在城市地铁车站建设中得到了广泛的应用^[1-3]。使用PBA法作为地铁车站的施工方法,前人已有了一定的研究^[4]。其主要研究成果包含:不同地区PBA法施工对周边建筑物的影响^[5],施工工艺及开挖顺序^[6],结构受力特性^[7],地表沉降规律^[8-9],支护结构受力特点等^[10]。但西安某地铁车站PBA法施工在黄土地区还是首次采用。对于黄土地区地铁车站的施工,在导洞施工方案、支护结构参数比选方面研究较多,而对于施工全过程研究还较少^[11-12]。因此,采用FLAC软件数值模拟和现场监测手段分析施工全过程地表沉降及边桩变形、受力规律对安全施工具有重要意义。以西安地铁6号线首个PBA法施工的地铁车站为背景,开展黄土地区PBA法施工地表沉降及边桩变形受力规律分析,目的是为同类地铁车站安全施工提供参考。

* 国家自然科学基金资助项目(11872299,12072259);陕西省自然科学基金基础研究计划-陕煤联合基金项目(2019JLP-01)

1 工程概况

1.1 工程背景

西安地铁 6 号线首个 PBA 法施工的地铁车站地处交通要道,其地面交通较繁忙、地下管线众多、周边环境复杂,是西安地铁第 1 个采用 PBA 法施工的暗挖车站。该车站为地下二层岛式站台,尺寸为 208.00 m(长)×19.90 m(宽)×16.73 m(高),埋深为 24.51 m,顶板覆土约为 10.40 m。车站沿东西向设置,包含 4 个出入口、2 组风亭。

1.2 工程及水文地质条件

地铁车站所在区域地形平坦,车站上面主要为市政道路,两侧均为商业建筑。地貌单元属皂河二级阶地。拟建场地土层从上往下分别为:人工填土,第四系全新统冲洪积黄土状土及砂类土,上更新统冲积粉质黏土及砂类土,中更新统冲积粉质黏土及砂类土等。

场地内地下水位较浅,为地面下 10.00~10.40 m,水位年变化幅度约为 1.0~2.0 m。

2 车站施工全过程数值模拟分析

采用 FLAC 软件对该地铁车站的施工全过程进行数值模拟分析。

2.1 模型建立

考虑边界效应对车站模型计算结果的影响,根据车站的具体尺寸建立车站模型,车站标准段宽为 19.9 m,车站顶板覆土 10.4 m。因此,模型上取至地面,下取至主洞以下约 40 m,左右两边各取距车站中线 40 m 处,形成尺寸为 80 m×70 m×20 m 的模型。计算模型如图 1 所示。

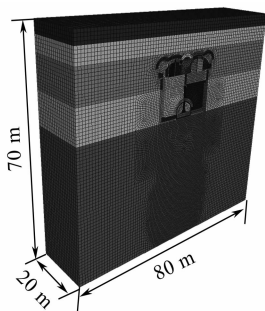


图 1 计算模型图

Fig. 1 Calculation model diagram

2.2 模型参数及边界条件选取

模型土层采用 M-C 模型,结构单元用弹性模型,钢管柱采用 beam 单元模拟,其余支护结构均用

实体单元模拟。边桩结构等效为地下连续墙,超前支护结构、格栅支护结构利用刚度等效原理,等效为一定厚度的混凝土结构。

模型上取至地面,模型上表面自由;模型左右以及下部分周围均是土体,因此左右边界、下表面约束。为考虑车站上部的风雪、车辆等活荷载的影响,模型上部施加地面超载 20 kPa。其结构模型如图 2 所示。

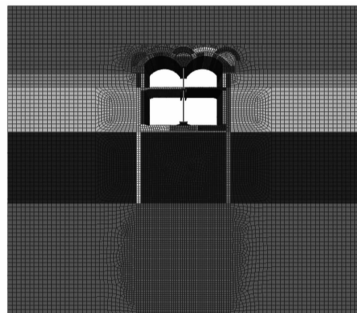


图 2 结构模型图

Fig. 2 Structure model diagram

2.3 模型监测点布置

设置地表沉降、边桩变形受力监测点,监测点布置如图 3 所示。监测点设置原则如下:

1) 地表变形监测点布置

为减小三维边界条件的影响效应的影响,取模型 Y 方向中间断面为研究断面。地表监测点沿 X 方向设置,遵循中间密两边疏原则,从车站中线向两边距离分别为 3 m、4 m 和 5 m。

2) 边桩变形、受力监测点

以 Y = 10 m 处断面为研究断面,Z 方向每隔 2 m 设置监测点。

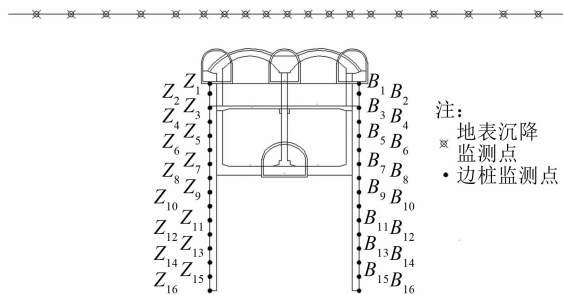


图 3 模拟计算的监测点布设图

Fig. 3 Diagram of simulation calculation monitoring points layout

2.4 数值模拟结果分析

为方便分析,将 PBA 法施工步骤分为 4 个主要阶段:①导洞施工阶段(I);②支撑体系施作阶段

(Ⅱ);③扣拱、二衬施作阶段(Ⅲ);④站台、站厅层施作阶段(Ⅳ)。

2.4.1 施工各阶段地表沉降分析

为分析各施工阶段地表沉降变化情况,绘制各阶段地表沉降曲线以及最大地表沉降随施工的变化曲线,如图 4 所示。

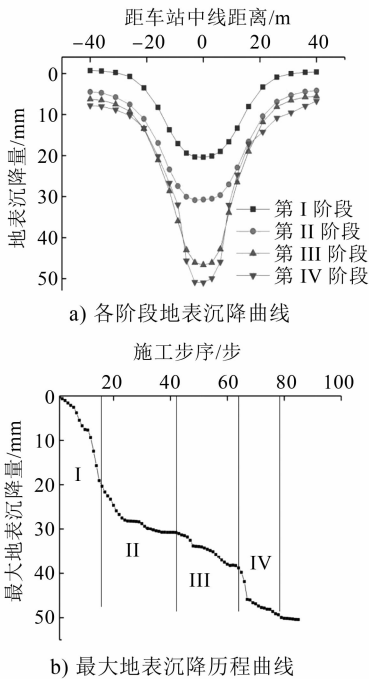


图 4 地表沉降曲线

Fig. 4 Ground surface subsidence curve

由图 4 a)可知,4 个阶段的地表沉降曲线均满足正态分布规律,由车站中线向两边减小,地表沉降的变化率遵循先平缓后增加再平缓的变化规律,即地表沉降变化主要发生在车站施工的主要影响区域范围内。对于本车站,其主要影响区域处于距车站中线 20 m 的范围内。各阶段施工完成后,最大地表沉降值分别为 20.39 mm、30.73 mm、46.64 mm、50.45 mm。

由图 4 b)可知,最大地表沉降随施工逐渐增加。第 I 阶段完成后,地表沉降值为 20.39 mm,地表沉降曲线的沉降速率较大;第 II 阶段产生的地表沉降主要包含导洞开挖后应力重分布时间效应产生的沉降和施工扰动引起的地表沉降,曲线的变化斜率较缓慢;第 III 阶段完成后的地表沉降值增加至 46.64 mm;第 IV 阶段施作产生的地表沉降值为 3.81 mm,最终的地表沉降值为 50.45 mm,此阶段产生地表沉降小,沉降曲线下下降缓慢(其主要原因在于车站已经形成了完整的支撑体系,对围岩已经起到了

保护作用。)

2.4.2 边桩变形受力分析

各施工阶段中间断面左边桩迎土侧各测点的水平位移随埋深的变化曲线以及边桩水平位移的历程曲线见图 5。左边桩竖向力随施工的变化曲线见图 6。

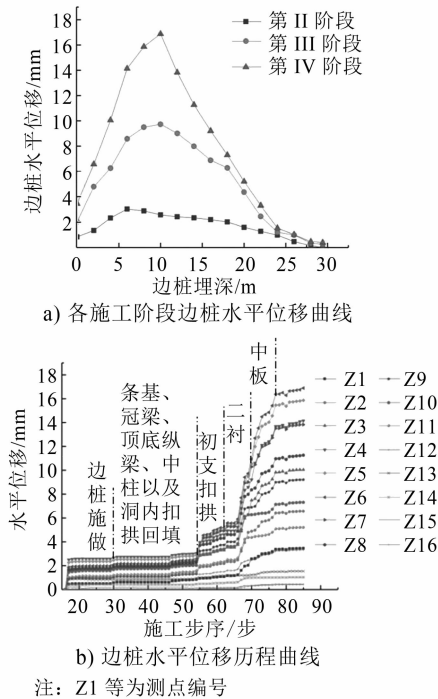


图 5 边桩变形曲线

Fig. 5 Deformation curve of side piles

由图 5 a)可知,各阶段的边桩水平位移曲线呈现鼓肚的形式,在第 II 阶段施工完成以后,土体未开挖,水平位移较小,且最大值离桩顶更近;第 III 阶段施工完成后,边桩的水平位移增加,且最大值位置下移;第 IV 阶段施工由于中底板位置上部土体开挖,水平位移值持续增加。

由图 5 b)可知,从曲线整体来看,随着车站施工,边桩水平位移持续增加,边桩施作完成后,由于施工的影响产生较小的水平位移,随着后续冠梁、中柱相关结构以及导洞内扣拱、回填混凝土的施作,水平位移变化较小;当进行初期支护扣拱部位开挖土体时,边桩水平位移增加,临时支撑的施作以及衬砌的强度可以抵抗变形,在该阶段后续施工中水平位移变化平缓;进行临时支撑破除、导洞初期支护破除、二次衬砌施作过程中,由于土体开挖和二次衬砌强度未达到设计值,边桩产生较大的水平位移,开挖中板上部土体时亦会产生较大水平位

移,当中板施作后,开始开挖下部土体时,水平位移曲线平缓,原因在于中板和侧墙可以抵抗变形。边桩水平位移最大值出现在边桩中上部位置,越接近桩底,边桩水平位移越小,直至桩底,可以发现边桩产生的水平位移已经很小,也证明了边桩的稳定性较好。

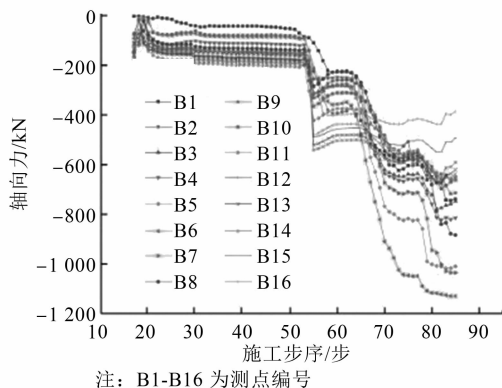


图6 边桩受力随时间步变化曲线

Fig. 6 Curves of pile stress changing with time step

由图6可知,边桩的轴向力随车站开挖不断增加,边桩主要承受压力,第II阶段施工完成后,边桩轴向力变化不明显,轴向力最大值为303.32 kN;边桩压力的增加主要发生在扣拱和中板以上土体开挖及中板施工的过程中,底板施工对轴向力的影响较小,对桩入土深度区域和影响较小区域还有轴向力减小的现象,主要原因在于底板施工时中板以及中板以上侧墙对边桩受力增加有一定的抑制作用。扣拱施工完成后最大轴向力为821 kN;底板施工完成后,最大轴向力为1 129.92 kN。

3 车站施工全过程现场监测分析

3.1 监测方案及监测点布设

1) 地表沉降监测。地表沉降监测点遵循中间密两边疏的原则,车站范围内每隔3 m设置1个监测点,车站外侧隔4 m设置1个监测点,最外侧次要影响区每隔5 m设置1个监测点。

2) 边桩应力监测。选取标准段试验桩进行测点布设,考虑不利工况和特征点,分别在桩顶、中层板处、中层板与底板中间、底板处、桩底分别设置钢筋应力片进行边桩轴向应力监测。

3.2 现场监测结果分析

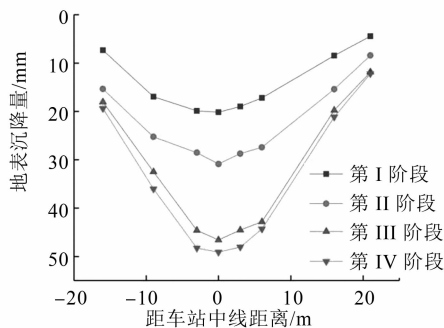
3.2.1 地表沉降监测结果分析

如图7所示,分别为各施工阶段地表沉降曲线

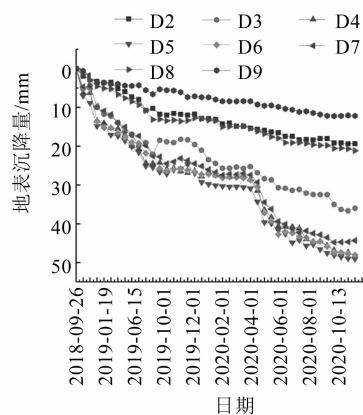
和地表沉降随时间的变化曲线。由于施工现场尚未完成车站整体施工,第IV阶段仅表示中板以上土体开挖。

分析图7 a)可知,各施工阶段地表沉降曲线变化规律与数值模拟结果相同,离车站中线最近的测点D5、D6越近,地表沉降量越大。在边缘的测点(D9),施工的进行对其地表沉降影响很小,当进行扣拱施工和主体结构施工时,边缘测点的地表沉降值已经接近稳定。

分析图7 b)可知,车站整体施工过程中,地表沉降量不断增加,增加速率呈现先增加后平缓,再增加最后平缓的现象,标准段施工至中板以上土体开挖位置时产生的最大地表沉降为49.10 mm,距离车站中线较近的两个测点产生的最大地表沉降分别为48.26 mm和48.06 mm。



a) 各施工阶段地表沉降曲线



b) 地表沉降随时间变化曲线

注: D2等为测点编号

图7 地表沉降变化分析

Fig. 7 Analysis of ground surface subsidence variation

3.2.2 边桩受力监测结果分析

如图8所示,分别为A30边桩迎土侧、背土侧和中性面钢筋轴向应力随时间的变化曲线,断面编号遵循自下而上原则。

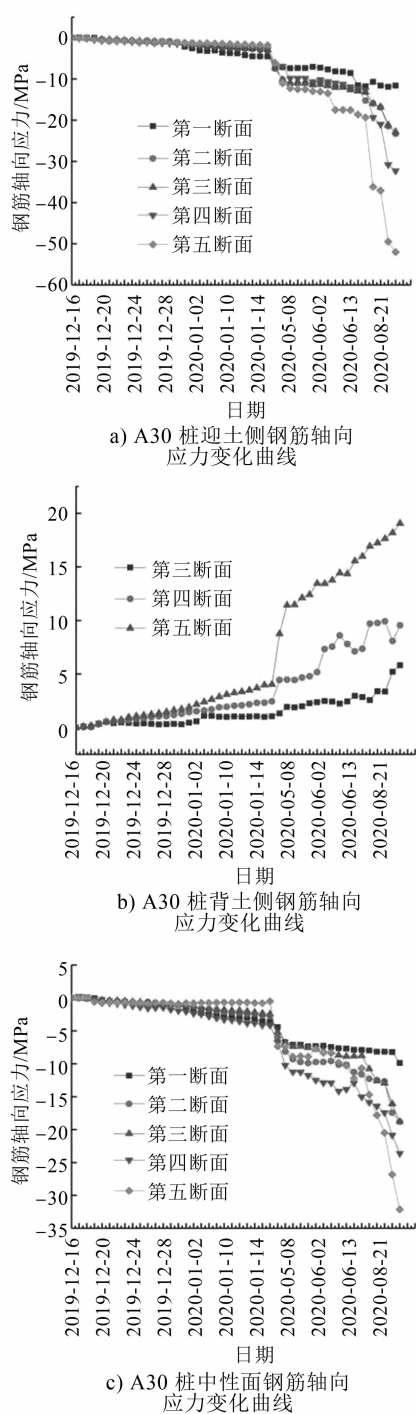


图 8 钢筋应力变化曲线
Fig. 8 Steel bar stress variation

由图 8 a)可知,迎土侧钢筋轴向应力总体随着时间呈增长趋势,且钢筋的应力值基本为负值,均处于受压状态。迎土侧钢筋应力值随时间变化经历了“平缓、加速,再平缓、加速增加”的过程。截至 2020 年 12 月,施工至中板土体开挖阶段,还尚未完成,此时标准段自下而上各断面迎土侧钢筋应力分

别为 11.61 MPa、23.30 MPa、22.81 MPa、32.28 MPa、52.00 MPa。

分析图 8 b)可知,背土侧钢筋轴向应力呈现受拉状态,仅在桩底偶尔会出现受压情况,变化规律和速率情况与迎土侧钢筋应力类似,但背土侧的应力值波动性比较大,主要原因在于受到施工扰动的影响较大。分析图 8 c)可知,中性面钢筋轴向应力呈现受压状态,钢筋压应力值小于迎土侧。

3.2.3 数值模拟与现场监测结果对比分析

为验证模拟模型的建立和参数选取的合理性,将数值模拟和现场监测结果作比较。由于现场施工还尚未完成,因此选取第 I 阶段、第Ⅲ阶段地表沉降曲线进行分析,如图 9 所示。

由图 9 可知,2 个阶段地表沉降曲线均沿中线呈基本对称分布,符合理论分析结果。从变化量方面考虑,数值模拟结果:车站中线最终地表沉降量为 20.39 mm,现场监测结果为 20.16 mm;扣拱阶段数值模拟和现场监测结果分别为 46.64 mm、45.59 mm。2 个阶段分析的结果相差较小,其相差最大值为 3.51 mm,在规范允许的差值范围内。

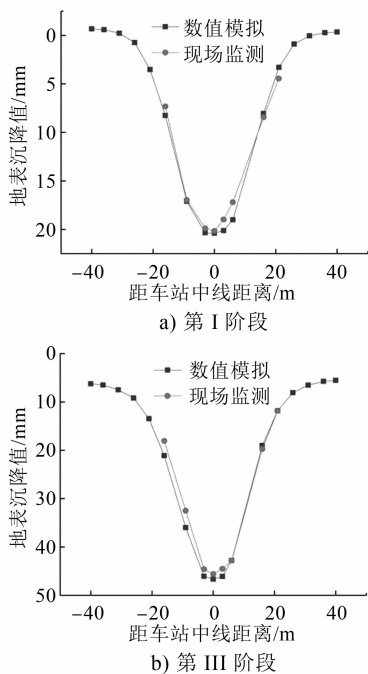


图 9 数值模拟与现场监测结果对比曲线
Fig. 9 Comparison curve between numerical simulation and field monitoring results

4 结论

1) FLAC 软件的数值模拟结果表明,地铁车站 PBA 法施工过程中,地表沉降曲线沿车站中线呈对称,主要影响区域在距车站 20 m 范围内;边桩水平位移呈现鼓胀形式,边桩水平位移最大值出现在边桩中上部位置,越接近桩底,边桩水平位移越小;边桩轴向力随车站开挖不断增加,边桩主要以承受轴向压力为主,底板施工完成后,最大轴向压力为 1 129.92 kN。

2) 现场监测表明,标准段导洞施工阶段完成后,最大地表沉降量为 20.16 mm;扣拱施工完成后,地表沉降最大值为 46.60 mm;车站整体施工过程中,地表沉降量不断增加,增加速率呈现先增加后平缓、再增加最后平缓的现象,标准段施工至中板以上土体开挖位置时产生的最大地表沉降量为 49.10 mm;标准段钢筋轴向应力总体随着时间呈增长趋势,钢筋应力值随时间变化经历了“平缓、加速,再平缓、加速增加”的过程;背土侧的钢筋轴向应力呈现受拉状态,仅在桩底偶尔会出现受压情况,迎土侧、中性面的钢筋轴向应力呈现受压状态。

3) 对比分析数值模拟与监测结果可知,导洞开挖完成后,最大地表沉降值分别为 20.39 mm、20.16 mm,扣拱阶段最大地表沉降值分别为 15.91 mm、15.73 mm,均在误差允许范围内,证明 FLAC 软件的数值模拟合理可行。

参考文献

- [1] 夏勇. PBA 洞桩法在地铁车站施工中的应用探述[J]. 智能城市, 2018(19): 84.
- XIA Yong. Discussion on application of PBA hole pile method in metro station construction[J]. Intelligent City, 2018(19): 84.
- [2] 杨军. PBA 洞桩法工艺技术在地铁车站中的应用研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2019(35): 34.
- YANG Jun. Research on application of PBA hole pile technology in subway station[J]. Theoretical Research on Urban Construction(Electronic Version), 2019(35): 34.
- [3] 杨雄. PBA 洞桩法在地铁车站施工中的应用[J]. 世界有色金属, 2017(1): 46.
- YANG Xiong. Application of PBA hole pile method in subway station construction[J]. World Non-ferrous Metals, 2017(1): 46.
- [4] 王明胜. 复杂环境下洞桩法地铁车站设计关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2017(3): 87.
- WANG Mingsheng. Research on the key technology of subway station design with hole-pile method under complex environment[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017(3): 87.
- [5] 朱红华, 王国光, 李凤涛. PBA(桩-梁-拱)工法在南京地铁 4 号线鼓楼站古建筑保护中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019(9): 149.
- ZHU Honghua, WANG Guoguang, LI Fengtao. Application of PBA method in the protection of ancient buildings on Nanjing metro line 4[J]. Urban Mass Transit, 2019(9): 149.
- [6] 贾蓬, 高登, 刘冬桥. 开挖顺序对 PBA 地铁车站竖向土压力分布影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021(6): 857.
- JIA Peng, GAO Deng, LIU Dongqiao. Influence of excavation sequence on the vertical soil pressure on PBA subway station[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2021(6): 857.
- [7] 秦建明. 暗挖车站关键施工技术研究及应用[J]. 山西建筑, 2021(6): 94.
- QIN Jianming. Research and application of key construction technology of underground excavation station[J]. Shanxi Architecture, 2021(6): 94.
- [8] 付春青, 刘波. PBA 法非对称不均匀变形引起地表沉降规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021(3): 927.
- FU Chunqing, LIU Bo. Study on the law of surface settlement caused by asymmetric uneven deformation of PBA method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021(3): 927.
- [9] 贾世涛. PBA 地铁车站施工过程中引起的地层沉降分析[J]. 铁道建筑技术, 2018(11): 72.
- JIA Shitao. Analysis on procedural ground settlement caused of metro station constructed by PBA method[J]. Railway Construction Technology, 2018(11): 72.
- [10] 王金明, 张子真, 孙玉辉, 等. 洞桩法车站施工边桩及中柱应力应变监测及受力分析[J]. 城市勘测, 2018(4): 158.
- WANG Jinming, ZHANG Zizhen, SUN Yuhui, et al. Stress and strain monitoring and stress analysis of side pile and middle column in station construction[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(4): 158.
- [11] 任建喜, 刘田田, 云梦晨, 等. 边桩对 PBA 法黄土车站地表变形的影响分析[J]. 铁道工程学报, 2020(1): 109.
- REN Jianxi, LIU Tiantian, YUN Mengchen, et al. Analysis of the influence of side-pile on the surface deformation of loess station by PBA method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020(1): 109.
- [12] 任建喜, 陈旭, 曹西太郎. 大断面黄土地铁隧道不同浅埋暗挖施工方法比较分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020(1): 120.
- REN Jianxi, CHEN Xu, CAO Xitailang. Comparative analysis of different shallow buried excavation methods for large section loess subway tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2020(1): 120.

(收稿日期: 2021-06-16)