

北京地铁粉质黏土地层新型PBA车站沉降规律研究

李永超¹, 毕殿雷²

(1. 北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100032; 2. 北京城建轨道交通建设工程有限公司, 北京 101100)

摘要: PBA(Pile-Beam-Arch)工法已成为北京地区繁华路段地铁暗挖车站的主流工艺,但因其工序转换复杂,施工流程步骤多,易引起地层沉降。新型PBA工法是在单层4导洞PBA工法的基础上,将中间导洞联合,共用中隔壁,形成CD法(中隔壁法)施工的大断面导洞,相较于传统双层8导洞PBA工法以及近些年推广的单层4导洞PBA工法,地层沉降规律难以掌握。以北京地铁22号线甘露园站为依托,运用有限元数值分析软件模拟车站施工过程,结合现场实测数据分析粉质黏土地层新型PBA车站地层沉降规律。结果表明:粉质黏土地层新型PBA车站施工过程中沉降最大发生在开挖面拱顶上方;地层沉降主要发生在导洞开挖与扣拱阶段,约占整体总沉降的89.5%;受中导洞形式影响,导洞施工阶段造成的地层沉降比传统PBA车站要大。

关键词: 粉质黏土地层; 地层沉降; 新型PBA(Pile-Beam-Arch)车站; 地铁车站

中图分类号: TU91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)03-0263-06

PBA(Pile-Beam-Arch)车站因其结构安全度高、对地面交通影响小等特点已经成为北京市区地铁车站施工的主流工法,相较于传统双层8导洞PBA工法与单层4导洞PBA工法,将首层中间两导洞联合起来,共用中隔壁,形成由CD(center diaphragm,中隔壁)法施工的大断面,并取消第二层导洞的PBA工法应用相对较少,传统概念中断面越大越不利于地表沉降控制,此时暗挖过程中地表沉降的控制就显得尤为重要。

近年来,国内外诸多学者已经对PBA车站地表沉降规律进行了研究。王昊统等^[1]对硬岩地区浅埋暗挖造成的地层沉降进行了研究,得到隧道正上方沉降变形最大,偏离隧道越远受开挖扰动越小的结论;王霆等^[2]通过对大量现场量测数据的统计分析,研究北京地区黏性土与砂性土互层的特定地层下浅埋暗挖法修建地铁车站地表沉降规律,研究表明洞桩法造成的地层损失率范围为0.39%~1.41%,中洞法为0.49%~1.03%;代维达^[3]通过统计分析的方法对北京地铁6号线浅埋暗挖地铁车站地表沉降规律进行研究,结果表明车站埋深与地表沉降大小不成反比,地表沉降区间频率曲线服从正态分布;罗富荣和汪玉华^[4]对北京地铁6号线一期及7号线PBA法暗挖车站的现场实测数据进行统计分析,得出PBA法施工引起的地表沉降主要发生在

导洞施工及扣拱施工阶段、不同地层中PBA工法引起的沉降差异较大的结论;杨会军和孔恒^[5]研究了PBA车站的沉降规律,结果表明车站主体施工引起的地表沉降分布范围为距车站中心两侧25~30m,小导洞开挖过程造成的地表沉降占总沉降的一半。同时也有学者运用数值模拟软件及各种分析方法对传统PBA车站及浅埋暗挖施工过程进行数值与相应地层沉降的理论研究,得到的结果与实际量测数据有较好的拟合性,表明数值研究在地层沉降规律方面可以为工程提供一定的事前参考^[6-15]。

但以往针对PBA车站沉降规律的研究均以传统PBA车站为背景,得出的结论大都是双层或单层4导洞PBA工法施工过程地层沉降规律。这些结论是否适用于当前新型PBA车站的建设有待考证。因此有必要对新型PBA车站施工引起的地层沉降规律进行相应研究,分析总结新型PBA车站施工过程中的地层沉降规律,以供今后为类似的车站施工提供借鉴。

1 工程概况

1.1 车站基本情况

北京地铁22号线(平谷线)工程甘露园站位于朝阳路与甘露园中街交叉口,沿朝阳路东西向敷设。车站主体为双层三跨暗挖岛式车站,车站主体结构为双柱三跨结构,采用新型PBA工法施工,共

收稿日期: 2023-11-19

作者简介: 李永超(1996—),男,山西吕梁人,助理工程师,硕士,研究方向为城市地下空间;毕殿雷(1990—),男,黑龙江绥化人,工程师,研究方向为城市地下空间。

设 3 个施工导洞(2 个边导洞+1 个中导洞,中导洞为 CD 法施工,先行洞室为 C)。车站剖面图如图 1 所示。车站地表沉降监测点布置剖面图如图 2 所示。

根据甘露园站地勘报告,车站小导洞拱顶主要位于黏质粉土-砂质粉土与粉质黏土层,车站底板位于细砂-中砂土层,车站主体结构主要位于粉质黏土层,部分区域位于砂层。车站建设范围地层示意图如图 3 所示。地层实际图如图 4 所示,中导洞形式如图 5 所示。

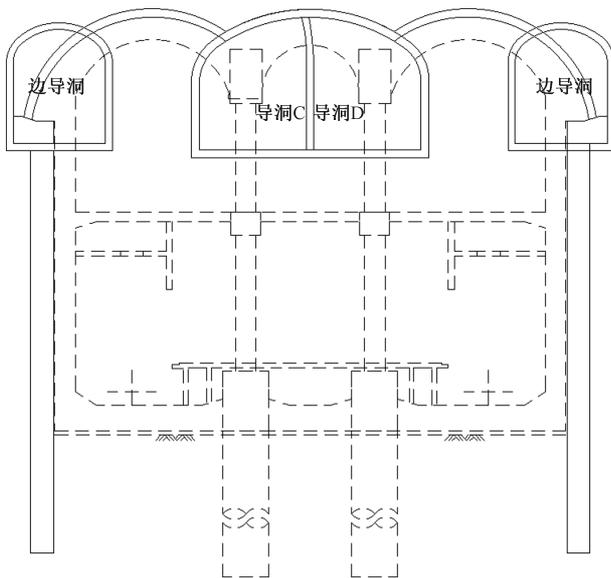


图 1 新型 PBA 车站结构剖面图

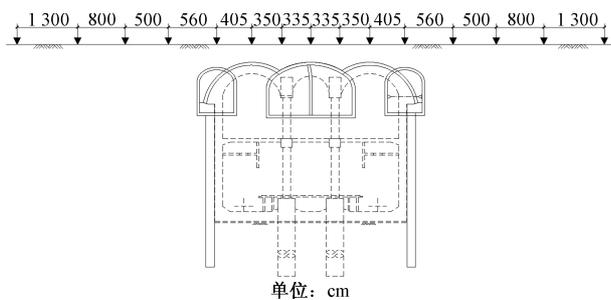


图 2 甘露园站地表沉降监测点布置剖面图

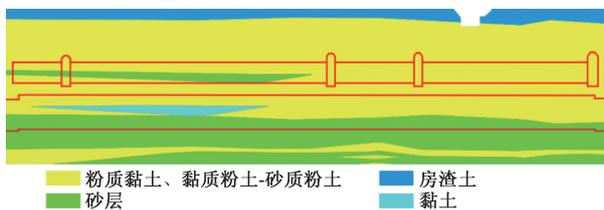


图 3 甘露园站地层示意图

1.2 地层沉降槽分析

地层沉降与施工周期密切相关,开挖支护时间



图 4 甘露园站现场土质



图 5 甘露园站中导洞形式

越长,地层应力释放越充分,导致地层变形也越大,尤其是导洞及扣拱施作阶段,对拱顶土体的卸荷可能对土体造成相对较大的扰动。对北京地铁 22 号线甘露园站监控量测数据进行分析,由于地层土体的不均匀性以及地下管线及周边建筑物的影响,导致同一轴线不同断面沉降的不同一性,离散型较大。为了减少拟合结果的误差,共选取 6 个断面 13 条轴线,使用 Peck 公式进行拟合,如式(1)所示,断面分布如图 6 所示。得到北京地铁 22 号线甘露园站粉质黏土层新型 PBA 车站导洞开挖期间地层沉降值范围为-72~-12 mm。

$$S = S_{\max} \exp\left(-\frac{y^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

式中: S 为距离车站中线某处的沉降值,mm; S_{\max} 为车站中线处的最大沉降值,mm; y 为测点与车站中线的水平距离,mm; i 为沉降槽反弯点距车站中线水平距离,mm。

采用 Peck 公式拟合的沉降槽曲线反弯点代表了导洞施工阶段对地层沉降的影响范围。由图 7 可知,粉质黏土层新型 PBA 车站导洞施工阶段对地层沉降的影响范围为中导洞拱顶上方 30 m 左右。

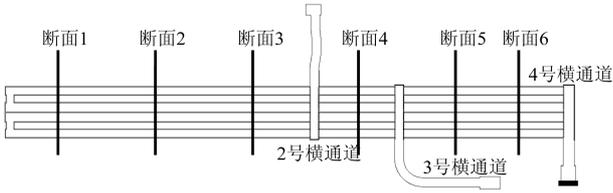


图 6 车站测点分布断面图

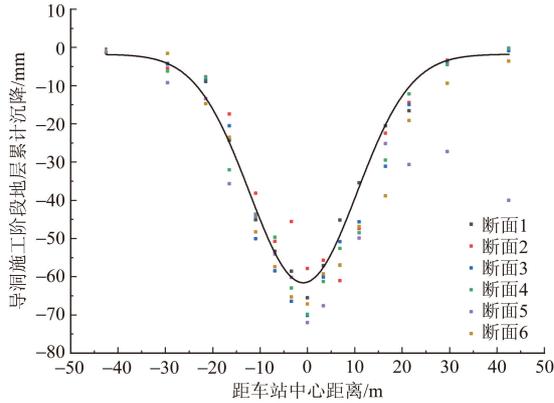


图 7 甘露园站导洞施工阶段沉降槽拟合曲线

1.3 地层沉降统计分析

图 7 显示,地表沉降的最大值主要分布在中导洞拱顶上方,沉降值与测点位置关系符合正态分布,统计各断面的沉降值,进而分析地表沉降的规律。导洞开挖阶段累计沉降曲线如图 8 所示。断面 5 沉降规律未遵循正态分布,主要原因是受车站 3 号横通道施工影响,距车站中心较远处测点所测沉降值实际上是施工 3 号横通道时造成的地层沉降,且边导洞与 3 号横通道中间地层会受到导洞施工与横通道施工的共同影响,因此该处量测的沉降值实际上是 3 号横通道施工与车站导洞施工的叠加,故该断面的沉降值与测点位置未遵循正态分布。

为了尽可能排除可能的影响因素(马头门破除、施工横通道等),以断面 2 测点数据为例,边导洞沉降值取两侧导洞沉降平均值。由图 9 可知,各导洞在施工过程中的最大沉降速率也即最大沉降比发生在掌子面开挖处前后 5~10 榀(一个钢格栅拱架称 1 榀)位置,导洞 D 地层沉降速率及沉降占比均小于其他导洞,主要原因是受先向导洞 C 影响。导洞 C 在开挖至该位置时深孔注浆及背后回填注浆范围已经包含部分导洞 D 区域,因此导洞 D 开挖时除自身的深孔注浆加固地层措施外,还受到导洞 C 背后回填注浆加固措施的保护,且导洞 D 开挖时中隔壁一侧土体已完成开挖,后期混凝土喷射不密实导致的土体滑落要比其他导洞少。但沉降曲线

仍有继续下降趋势,说明开挖过程造成的地层沉降并不是快速完成并趋于稳定,而是有一定的滞后性,随着开挖掌子面继续远离测点,同时跟进背后回填注浆,地层沉降逐步趋于稳定。

导洞施工对地层沉降有一定的影响范围,对各导洞施工时其余导洞的拱顶沉降值进行研究,各导洞施工阶段的地层沉降曲线如图 10 所示。由图 10 可知:①边导洞施工过程互相几乎无影响;②中导洞

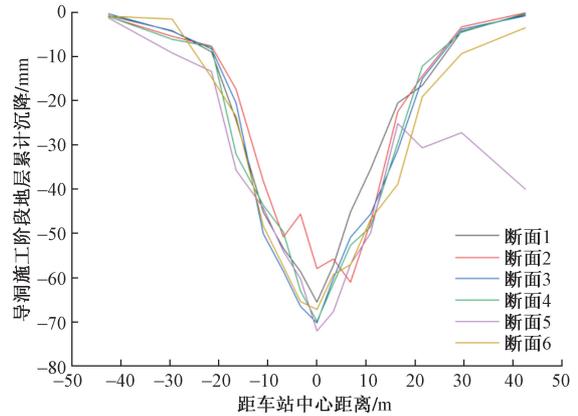


图 8 甘露园站导洞施工阶段地层累计沉降曲线

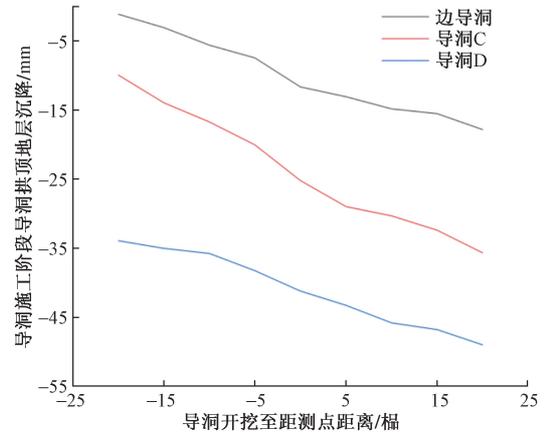


图 9 甘露园站导洞施工阶段沉降曲线

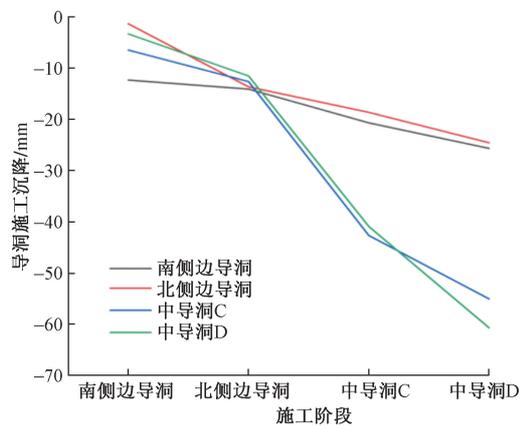


图 10 甘露园站各导洞施工阶段累计沉降曲线

各洞室施工过程中对较近侧边导洞影响较大,对较远侧边导洞影响较小;③导洞 D 施工过程中对导洞 C 影响较大,对较近侧边导洞影响较大,对较远侧边导洞几乎无影响影。

2 数值模拟

考虑到现场试验段及过程量测的局限性与事后性,无法满足车站建设的整体性影响分析。利用工程类有限元数值模拟软件,不仅可以解决从简单的线性静力学问题到复杂的非线性耦合问题,还能分析瞬态动力学问题与涉及接触条件的高度非线性问题,广泛应用于各种工程模拟,若参数选择合理,可以满足一般的数值计算要求及结果预测。

2.1 模拟方案

新型 PBA 工法工序转换频繁,为更好地分析施工过程中各阶段地层变化情况,将车站整个施工过程分成 6 个阶段,数值计算过程为:①地应力平衡;②边导洞开挖施做初期支护;③中导洞开挖施做初期支护;④梁柱体系、顶纵梁及边扣拱施工;⑤中间扣拱开挖施做初期支护;⑥边拱二衬施工;⑦站台、站厅层开挖施作车站主体结构。

2.2 模型介绍

根据地勘钻探成果,车站结构拱顶主要位于粉质黏土层,拱底位于细砂-中砂层。考虑到现场不同土层土质较为均匀,数值模拟中土体参数将参考实际进行设定。假定不同深度下采用不同的土体参数,各深度下土体是各向同性且均匀的,为保证计算精度,综合考虑隧道开挖可能的影响范围,最终设定土体模型尺寸为 $60\text{ m} \times 40\text{ m} \times 24\text{ m}$,并将车站开挖周边土体细化,土体模型左右及前后施加法向约束,底部施加法向及切向约束。土体采取摩尔-库仑准则构建,并根据地勘报告赋予土体各深度不同的物理参数,模型整体施加 9.8 m/s^2 的竖向重力加速度,开挖完成后,被开挖土体将完全被剥落不再与地层产生作用。为了较好地模拟开挖过程,使用生死单元法通过设定不同的分析步来体现 PBA 工法的施工过程。主要涉及的土体模型具体参数见表 1,车站结构模型如图 11 所示,施工步序如图 12 所示,车站各结构物理参数见表 2。

表 1 土体模型物理参数

参数	数值	
	粉质黏土	细砂-中砂
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 980	2 050
摩擦角/ $(^\circ)$	11.4	38
弹性模量/MPa	8	50
泊松比	0.35	0.30

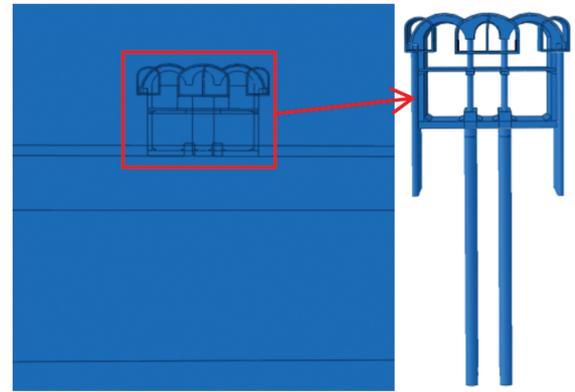


图 11 车站结构模型

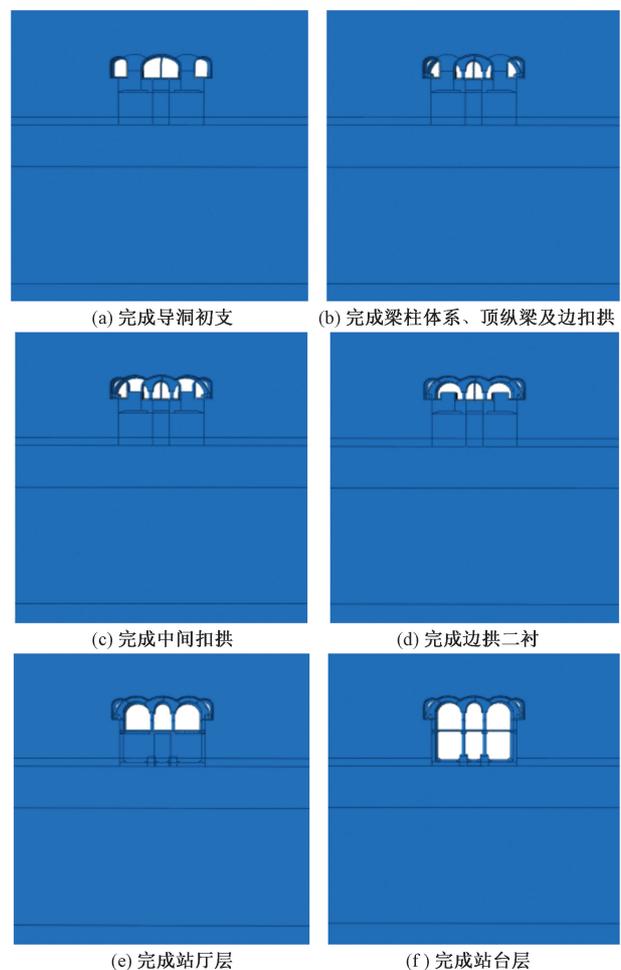


图 12 施工步序

表 2 车站结构物理参数

类别	弹性模量/MPa	泊松比	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
主体结构、二衬	32.5	0.20	2 500
钢管柱	53	0.25	3 000
桩、冠梁	30	0.20	2 500
初期支护	25.5	0.20	2 500

3 模拟结果与分析

基于前述的施工顺序,利用 Abaqus 研究各阶段的最大沉降值,并与实测数据进行对比分析。各施工阶段地层沉降模拟值见表 3。

表 3 各施工阶段地层沉降模拟值

施工阶段	沉降模拟值/mm
导洞开挖施做初期支护	-65.33
梁柱体系、顶纵梁及边扣拱施工	-8.55
中间扣拱开挖施做初期支护	-18.65
边拱二衬施工	-3.23
站台、站厅层施工	-2.01

从模拟结果可知,导洞开挖施作初期支护的沉降模拟值小于实测值,以各断面实测沉降最大值的平均值为真值,对比数值模拟的结果,导洞开挖施作初期支护的误差为 6.23 mm,原因主要为现场辅助施工方法为降水施工,开始降水时间为开挖前的 15 d,降水未完全完成,导致开挖期间地层孔隙水压力逐步消散,有效应力逐步增加,造成地层本身的固结沉降。实测数据包含了降水导致的地层沉降,数值模拟的结果符合实际情况。

根据吴精义等^[6]的研究结果,有效降水后的传统 PBA 法施工地铁车站,在导洞施工阶段的最大沉降值分布区间为 -33.59~-44.55 mm,新型 PBA 工法与传统 8 导洞 PBA 工法导洞施工期间导致的地层沉降值差异较大,主要原因为新型 PBA 工法联合中间导洞,使得中间导洞分步开挖时拱部形成的自然拱无法与导洞形状更好地贴合,间接导致中间导洞初支结构与地层之间的空隙增大,且各导洞仍处相邻导洞施工的影响范围内,群洞影响效应较为明显,结合背后回填注浆的相对滞后性以及开挖过程对地层造成的相应扰动,导致了导洞开挖期间地层沉降较大。

由上述研究可知:①新型 PBA 车站施工期间的最大沉降发生在导洞施工与中间扣拱施工期间,占比达到 89.5%,与罗富荣和汪玉华^[4]的研究结论一致;②各工序施工导致地层应力的重分布,使得地层产生了位移变形,因导洞与扣拱开挖阶段是对四周土体尤其是拱顶土体的卸荷,造成的扰动较大,在应力重分布时造成的地层变形较大;③导洞开挖期间群洞效应明显,中间导洞分步开挖时由于导洞拱部形态与该地层中自然拱形式不同,造成的沉降比传统 PBA 车站要大。

4 结论与建议

通过对新型 PBA 车站导洞施工阶段实测数据

的总结归纳,利用有限元分析的方法对车站施工过程进行数值研究,验证了数值研究导洞施工阶段沉降规律的正确性,并对后期施工阶段的沉降值进行了预测。北京地区粉质黏土地层覆土厚度小于车站整体高度的新型 PBA 车站施工引起的地层沉降规律如下。

(1)粉质黏土地层新型 PBA 车站施工过程沉降最大发生在开挖面拱顶上方,总体最大沉降分布在中导洞拱顶上方;沉降值与测点位置的关系符合正态分布,导洞施工过程最大沉降速率及占比发生在掌子面处前后 5~10 榀位置。

(2)粉质黏土层中新型 PBA 车站施工影响的范围大约为车站中轴线左右各 30 m 左右。

(3)中导洞施工时地层沉降速率及占比均大于边导洞,且先行洞室造成的地层扰动要大于后行洞室,受中导洞形式影响,导洞施工阶段造成的地层沉降比传统 PBA 车站要大。

(4)根据数值研究结果,粉质黏土层新型 PBA 车站施工地层沉降主要发生在导洞开挖与扣拱阶段,占整体总沉降的 89.5%,车站整体施工过程中发生沉降较大的工序为中导洞施工,站台与站厅层施工阶段未发生明显沉降。

(5)导洞施工期间的数值研究结果与实际值误差为 6.23 mm,数值模拟的结果符合实际情况,参数选择合理,后续工序的数值研究结果可为今后工程提供借鉴。

目前新型 PBA 车站的应用较少,对其沉降规律的研究相应不够系统,可供参考的实际数据较为欠缺。基于统计分析以及数值研究的方法,仅对甘露园站导洞施工阶段的沉降规律利用理论与实际相结合方式进行研究,因受限于数据的有限性以及数值分析的精确程度,加之现场施工水平因素未能完全顾忌,故研究结果仅可作为参考,随着后期越来越多新型 PBA 车站的建设,其研究结论会更加精确。

参考文献

- [1] 王昊统,吴雪峰,杨忠年,等. 硬岩地区浅埋暗挖隧道施工地表沉降特征模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 13001-13008.
- [2] 王霆,刘维宁,张成满,等. 地铁车站浅埋暗挖法施工引起地表沉降规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1855-1861.
- [3] 代维达. 北京地铁 6 号线浅埋暗挖法车站施工地表沉降规律研究[J]. 铁道建筑, 2014(4): 63-67.

- [4] 罗富荣, 汪玉华. 北京地区 PBA 法施工暗挖地铁车站地表变形分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(1): 20-26.
- [5] 杨会军, 孔恒. 浅埋大跨暗挖地铁车站施工地表沉降分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(5): 81-85.
- [6] 吴精义, 叶新丰, 余鹏, 等. 北京地铁粉细砂层 PBA 车站沉降规律研究[J]. 隧道建设, 2020, 40(10): 1408-1416.
- [7] 魏纲, 姜婉青. 浅埋暗挖隧道引起建筑物沉降的预测方法[J]. 科学技术与工程 2018, 18(32): 107-112.
- [8] 陈炳春, 邓刚, 董文广. PBA 工法上导洞施工初期支护变形数值模拟分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(S2): 63-68.
- [9] 刘波, 付春青, 聂亚抄, 等. 洞桩法施工对地表沉降影响的数值模拟及实测研究[J]. 施工技术, 2018, 47(4): 115-119.
- [10] 尹志清, 苏明. 浅埋暗挖地铁隧道引起地表沉降的数字模拟与实测分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 37-40.
- [11] 刘兰利. 北京地铁 7 号线广安门内站道路沉降规律分析[J]. 铁道建筑技术, 2014(6): 39-44.
- [12] 孙玉辉, 李晓萌, 陈昌彦, 等. 单层洞桩法较 PBA 优势及合理开挖顺序模拟分析[J]. 岩土工程技术, 2022, 36(5): 360-364.
- [13] 黄华. 北京地区砂卵石地层 PBA 工法暗挖轨道交通车站沉降变形规律研究[J]. 中国市政工程, 2021(6): 107-109.
- [14] 詹涛, 吴波, 吴兵兵, 等. 紧邻浅埋暗挖地铁隧道地下密集管线及土层变形[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4755-4764.
- [15] 苏玥, 叶斌. 基于上海软土模型暗挖法隧道施工的力学特性[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 11137-11146.

Study on Settlement Law of New PBA Station of Beijing Metro in Silty Clay Stratum

LI Yongchao¹, BI Dianlei²

(1. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Beijing 100032, China;

2. Beijing Urban Construction Rail Transit Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 101100, China)

Abstract: The PBA (Pile-Beam-Arch) construction method has become the mainstream technology for underground excavation of subway stations in bustling sections of Beijing. However, due to its complex process transformation and multiple construction steps, it is prone to geological settlement. The new PBA construction method is based on the single-layer 4-guide hole PBA method, combining the middle guide hole and sharing the middle partition wall to form a large cross-section guide hole constructed by the CD (center diaphragm) method. Compared to the traditional double-layer 8-lead PBA method and the recently promoted single-layer 4-lead PBA method, it is difficult to grasp the law of geological subsidence. Based on the Ganluyuan Station of Beijing Metro Line 22, finite element numerical analysis software is used to simulate the construction process of the station. Combined with on-site measured data, the settlement law of the new PBA station in the silty clay layer is analyzed. The results show that the maximum settlement during the construction process of the new PBA station in the silty clay layer occurs above the arch of the excavation surface; Ground subsidence mainly occurs during the excavation and arching stages of the pilot tunnel, accounting for approximately 89.5% of the total subsidence. Due to the influence of the form of the pilot tunnel, the geological settlement caused by the construction phase of the pilot tunnel is greater than that of traditional PBA stations.

Keywords: silty clay stratum; stratum settlement; new PBA(Pile-Beam-Arch) station; metro station