# 洞桩法地铁车站导洞开挖方式对地表沉降的 影响分析

杨韶林1,郭高鹏1,姚梦飞2,郝 哲1,孙 煜1

<sup>1</sup>中铁七局集团第三工程有限公司,陕西 西安 <sup>2</sup>长安大学公路学院,陕西 西安

收稿日期: 2024年11月8日; 录用日期: 2025年1月8日; 发布日期: 2025年1月20日

#### 摘要

目的:本文依托西安地铁8号线小白杨站实体工程,为探究洞桩法地铁车站导洞施工阶段,导洞断面施工 方法和开挖错距对地表沉降及支护结构变形的影响。方法:采用数值模拟与现场监测的方式。结果及结 论:研究结果表明:对于单层三导洞洞桩法车站而言,导洞开挖方法采用预留核心土弧形开挖法以及"先 中后边"错距20m施工顺序,更有利于控制地层及支护结构变形;在导洞断面施工方面,全断面开挖引 起的地表沉降最大值均大于相应施工顺序下预留核心土弧形开挖,沉降差异介于8mm以内;在开挖错距 方面,相邻导洞掌子面距离越大,施工引起的地表沉降越小,最大地表沉降以相邻错距10m为基准,15、 20、25、30m时,依次减小了6%、5.3%、2.5%、1.9%,且当错距大于20m时,地表沉降的减小趋势 已不明显。相关研究成果可为今后类似工程施工提供借鉴意义和参考价值。

### 关键词

地铁,洞桩法,数值计算,粉质黏土-中砂互层,导洞开挖,施工阶段分析

# Analysis of Influence of Guide Tunnel Excavation Method on Surface Settlement in Subway Station Constructed by PBA Method

#### Shaolin Yang<sup>1</sup>, Gaopeng Guo<sup>1</sup>, Mengfei Yao<sup>2</sup>, Zhe Hao<sup>1</sup>, Yu Sun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Third Engineering Co., Ltd. of China Railway Seventh Group, Xi'an Shaanxi <sup>2</sup>School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: Nov. 8th, 2024; accepted: Jan. 8th, 2025; published: Jan. 20th, 2025

#### Abstract

Objective: Based on Xiaobaiyang Station of Xi'an Metro Line 8, this paper studied the influence of the construction method of the pilot tunnel section and the excavation stagger distance on the surface settlement and the deformation of the supporting structure. Method: This paper adopts numerical simulation and field monitoring. Result & Conclusion: The results show that: for the single-layer three-pilot tunnel station constructed by PBA method, The excavation method of the guide tunnel adopts the arc excavation method of reserving the core soil and the construction sequence of "first, middle and back" is 20m apart, which is more conducive to controlling the deformation of the stratum and the supporting structure; in the construction of pilot tunnel section, the maximum ground settlement caused by full-face excavation is greater than that caused by arc excavation of reserved core soil under the corresponding construction sequence, and the settlement difference is within 8 mm. In terms of excavation offset, the larger the distance between the adjacent heading face, the smaller the surface settlement caused by construction. The maximum surface settlement is based on an adjacent displacement of 10 m, and decreases by 6%, 5.3%, 2.5% and 1.9% respectively at 15, 20, 25, and 30 m. When the offset is greater than 20 m, the decreasing trend of surface settlement is not obvious. The relevant research results can provide reference for similar engineering construction in the future.

## Keywords

Subway, PBA Method, Numerical Calculation, Silty Clay-Medium Sand Interbed, Guide Tunnel Excavation, Analysis of Construction Stage

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

# 1. 引言

洞桩法是基于浅埋暗挖法和盖挖逆筑法发展产生的新型地铁车站施工方法,目前已经在北京[1]-[3]、 沈阳[4] [5]等地区得到广泛应用。洞桩法主要依靠导洞群为后期桩、梁、拱承载体系提供施工作业空间, 因此选择合理的导洞开挖形式,对施工环境效应[6] [7]、工程经济成本有着显著影响。目前已有许多学者 针对洞桩法导洞施工阶段进行研究。杜欣采[8]用数值模拟的方法,对地铁换乘车站洞桩法开挖工序进行 比选;李金奎等[9]对地层受洞桩逆筑法施工时产生的群洞效应影响进行研究,研究表明,多导洞施工过 程中,作业方式的选择在控制地表沉降中占主导因素;宗翔[10]根据边桩施工阶段及中导洞开挖阶段沉降 曲线特征参数之间的关系以及此两阶段沉降占总体沉降的比例关系,建立了估测洞桩法施工引起地面沉 降的预测方法;王秀英等[11]据数值模拟结果建立 GM 灰色模型对洞桩法下穿既有管线工程沉降进行预 测;王忠良[12]研究了洞桩法上、下导洞施工顺序对既有结构内力的影响,总结分析导洞施工顺序对既有 人防隧道内力的影响规律。洞桩法导洞断面开挖作业方式主要以地表沉降作为评价指标。本文依托西安 地铁 8 号线小白杨站,采用 FLAC3D 数值差分软件和现场监测手段,分析洞桩法地铁车站单层导洞断面 开挖方式对地表沉降变形的影响规律,综合考虑施工效率、环境扰动等因素,优化导洞群的断面施工工 法、相邻导洞掌子面错距等施工过程;通过现场监测数据验证研究结论的可靠性,并为工程实际提出科 学合理建议。相关研究成果可为西安地区类似工程提供参考借鉴。

# 2. 依托工程简介

## 2.1. 工程简介

西安市地铁 8 号线小白杨站位于大兴东路与桃园北路十字西侧,如图 1 所示。该段道路临近高架快速干道出口,行车流量较大,日常交通繁忙,场地地貌单元属皂河 I 级阶地。



Figure 1. Engineering plan 图 1. 工程平面图

拟建车站场地地势南高北低,地面高程处于 394.26~395.07 m 之间。车站主体结构埋深 24.51 m,顶 板覆土约 10.4 m。车站主体结构最大横断面宽 26.9 m,高 19.2 m,为双拱单柱双层三导洞车站结构型式,车站结构如图 2 所示。



**Figure 2.** Cross-sectional structural diagram of the station 图 2. 车站横断面结构示意图

### 2.2. 水文及地质条件

西安市位于渭河盆地东南隅,与西安市地铁八号线相交或距离较近的断裂构造主要有长安-临潼断

裂(F1)、皂河断裂(F2)和浐河断裂(F3),均为隐伏状态。车站北侧为汉城湖地表水体,湖水面高程约 390.10 m,比本车站地下水位高约 7.00~8.30 m,与本车站距离约 805 m,对本车站降水施工影响小。车站施工范围内地基土按地层岩性自上而下分别为杂填土、素填土、黄土状土、粉质黏土、中砂,除粉质黏土及粉质黏土中砂夹层外,其余各层土在拟建场地内连续成层均匀分布。

#### 3. 数值模型建立及验证

#### 3.1. 模型概况

采用 FLAC3D 有限元软件,建立了如图 3 所示的数值计算模型。根据圣维南原理及研究内容的需要, 模型上边界取至地表,下边界距离车站底板大概取 2 倍的车站高度,横向跨度取车站结构宽度的 5 倍, 模型最终尺寸为 120 m×90 m×70 m。模型以车站标准段为参考,结构顶部覆土 10.4 m,导洞结构采用 马蹄形断面,净空尺寸为 4.6 m×5.6 m,相邻导洞轴线间距 11.25 m。



Figure 3. Numerical simulation model 图 3. 数值模拟模型图

#### 3.2. 材料参数及计算假定

车站范围内土体均采用 Mohr-Coulumb 本构模型,并假定各土层分布均匀、表面水平。车站支护结构 均采用弹性模型,导洞钢筋混凝土支护结构采用等效刚度原理,转换为实体单元进行模拟分析。对于材 料弹性模量,现有数值模拟中一般取压缩模量的 2~5 倍[13],进行反复试算,本文在此基础上参考西安地 区相似研究的取值方法确定[14]-[16]。地层及支护结构材料参数赋值见表 1。

化1. 地法及出门乡奴					
地层	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	E/MPa	ν	c/kPa	$arphi/(\degree)$
杂填土	16.8	16	0.38	5.0	10.0
素填土	15.8	18	0.35	10.0	12.0
黄土状土	18.0	30	0.30	29.0	21.0
粉质黏土	20.0	37	0.30	40.0	25.0
中砂	20.4	46	0.25	0	32.0
注浆加固区	22.0	60	0.25		—
支护结构	23.0	300,000	0.20		_

# Table 1. Geological and structural parameters 表 1. 地层及结构参数

#### 3.3. 模型监测点布置

考虑到边界条件对模型计算结果的影响,选取模型纵向中间断面(Y = 45 m)作为本次研究的监测断面。读取导洞拱顶沉降分析不同导洞开挖方式对导洞支护结构的影响,并以各导洞拱上方地表沉降作为主监测点,相邻主监测点间布置加密监测点,共布设11个地表沉降监测点,断面监测点布置情况如图4。



Figure 4. Cross-section monitoring points 图 4. 断面监测点位

### 3.4. 模型验证

西安地铁 8 号线小白杨车站实际施工过程中,由于场地附近老旧管道破裂,影响到右线导洞的开挖 工作,导洞群断面开挖方式为自左向右依次开挖,相邻导洞掌子面错距 30 m。工程实际施工示意图如图 5 所示。



**Figure 5.** Actual construction plan 图 5. 工程实际施工方案

根据小白杨站现场开挖方式进行数值模拟,并将计算结果与现场监测数据进行对比分析,如图 6 所示,可以认为数值模拟计算结果与工程实际基本吻合。整体而言,导洞施工阶段最大地表沉降均位于中导洞正上方地表。模拟计算得到的最大地表沉降值为 20.9 mm,实测沉降曲线的最大地表沉降值为 22.7 mm,误差为 7.9%,分析原因为数值模拟并未考虑竖井、横通道施工对既有地层的扰动,同时地铁车站施工要求无水作业,数值模拟忽略了前期地下水位降水、地上降雨渗流作用的影响,因此现场实测地表沉降结果略大于数值模拟。

图 7 为左、中、右线三线导洞的初支结构拱顶沉降与数值模拟计算结果对比。分析发现,导洞初支 结构拱顶沉降最大值的数值模拟结果较好,左、中、右线三线导洞的现场监测结果比模拟结果略微大一 点,沉降差异介于3mm~4.2mm之间。这是由于现场实际开挖情况复杂,有时会遇到特殊情况,可能做不到及时支护;相比之下数值模拟的地层状态较为均匀,支护也是严格按照 fish 语言"一步一开挖、一步一支护"的,达到了理想的开挖作业状态,所以导致其结果偏小。虽然初支拱顶沉降最小值模拟误差相对较大,但并未影响结构安全性,因此认为本次数值模拟结果较为合理。



**Figure 6.** Comparison of simulated and monitored surface settlement during pilot tunnel excavation 图 6. 导洞开挖地表沉降模拟与现场监测对比



Figure 7. Comparison of simulated and monitored crown settlement during pilot tunnel excavation

图 7. 导洞开挖拱顶沉降模拟与现场监测对比

综上,关于地表沉降的模拟结果以及导洞初支结构拱顶位移的计算结果,两者同现场实测数据的对 比都在合理范围之内,验证了本文数值模拟模型的合理性及参数取值的准确性。

#### 4. 断面施工方法对地表沉降影响

#### 4.1. 断面开挖工法方案设计

鉴于导洞开挖断面面积较小,施工作业空间有限,工程实际中往往采用全断面法或者预留核心土弧

形开挖法,本节研究在这两种开挖方式下,分别对导洞"先中后边"和"先边后中"两种施工顺序模拟 分析,相邻掌子面错距参考工程实际取 30 m。表 2 为断面开挖工法方案表。

工况编号	施工方法	具体说明
3-1	预留核心土弧形开挖	同步开挖
3-2	预留核心土弧形开挖	先边后中
3-3	预留核心土弧形开挖	先中后边
3-4	全断面开挖	同步开挖
3-5	全断面开挖	先边后中
3-6	全断面开挖	先中后边

 Table 2. Cross-sectional excavation methods

 表 2. 断面开挖工法

#### 4.2. 不同断面开挖方式对地表沉降影响

以工况 3-1 为例,首先分析导洞不同断面开挖方式对地表沉降的影响,如图 8 所示。分析可知,导 洞开挖在时间和空间上都是高度对称的开挖工序,地表沉降曲线沿着中轴线两侧呈对称分布。由于在对 称施工的条件下,两侧边导洞开挖持续扰动中部地层,这对于中导洞自身洞周围岩的稳定性是不利的, 两侧扰动导致沉降在中导洞上方发生叠加,造成中轴线纵向生成沉降带,在一定程度上也是开挖群洞效 应影响的结果。



Figure 8. Surface settlement under condition 3-1 图 8. 工况 3-1 地表沉降

图 9 为不同断面施工方法下地表沉降情况。分析可知,全断面开挖引起的最大地表沉降均大于预留 核心土法施工,其中工况 3-4 即全断面同时开挖引起的沉降最大,达到了 22.7 mm,而与之相对应的预留 核心土弧形开挖法同时开挖引起的地表沉降为 18.2 mm,即在最不利工况下预留核心土弧形开挖相较于 全断面最大地表沉降减小了 19.8%;全断面最优工况"先中后边"开挖引起的最大沉降为 18.3 mm,与预 留核心土法的最不利工况基本接近。

在相同的导洞开挖顺序下,导洞全断面开挖引发的地表沉降略微大于预留核心土法施工,最大工况的差异不超过8mm。由于小导洞断面面积较小,在保证支护及时且强度足够的情况下,其引发的地层损失是可以接受的。不过由于工程实际一般比较复杂,难以做到及时支护,且目前开挖技术不够整齐,故

大多 PBA 导洞开挖不会采取全断面开挖的形式。



**Figure 9.** Surface settlement curve profiles for different cross-sectional excavation methods 图 9. 不同断面开挖方式下地表沉降曲线形态

#### 4.3. 不同断面开挖方式对支护变形影响

表 3 为不同工况下,边导洞及中导洞拱顶沉降计算结果。分析可知,全断面"先边后中"开挖的中导洞拱顶最大,达到 28.5 mm。无论是中导洞还是边导洞,在各对应工况下全断面开挖引发的拱顶沉降都 要稍大于预留核心土开挖对地层影响,沉降差异介于 1.5 mm~5 mm 之间。

工况编号	中导洞拱顶沉降/mm	边导洞拱顶沉降/mm
3-1	-22.6	-20.0
3-2	-23.8	-18.4
3-3	-17.6	-22.0
3-4	-26.5	-22.6
3-5	-28.5	-22.4
3-6	-20.2	-23.5

 Table 3. Crown settlement for different cross-sectional excavation methods

 表 3. 不同断面开挖方式下拱顶沉降

分析原因为,一方面是导洞本身尺寸较小,断面面积不大,即使是全断面开挖对掌子面周边围岩的 扰动也有限;另一方面与实际开挖作业不同,数值模拟导洞支护时较为及时,在进行一定应力释放后直 接在掌子面一周施加初支结构,一定程度上"阻碍"了过大的洞室收敛。

进一步分析支护结构位移云图可知,导洞施工阶段地层沉降位移峰值集中在导洞拱顶附近,并略大于地表沉降峰值,图 10 为工况 3-4 计算得到的支护结构及地层沉降位移结果。此外相较于预留核心土弧形开挖法,全断面开挖引发的导洞底部地面隆起也相对明显,尤其是工况 3-4 三导洞同时开挖,中导洞底部隆起达到了 22.5 mm,边导洞底部也达到 21.8 mm,分析原因为在地层中同时卸载过多土体,掌子面

底部应力变化过大的缘故。



Figure 10. Surface settlement under condition 3-4 图 10. 工况 3-4 地表沉降

## 5. 相邻导洞错距对地表沉降影响

### 5.1. 相邻导洞错距方案设计

上述研究表明,三导洞开挖的最佳施作方法是预留核心土弧形开挖法,导洞最优施工顺序为"先中 后边"。本小节基于断面施工最优方案,研究掌子面错距开挖对地表沉降的影响,对导洞开挖进行工况 分类,具体工况如表4所示。

工况编号	开挖错距/m	断面施工方法
3-7	10	
3-8	15	
3-9	20	先中后边,预留核心土弧形开挖
3-10	25	
3-3	30	

Table 4. Pilot tunnel stagger distance schemes 表 4. 导洞断面错距方案

### 5.2. 不同导洞错距对地表沉降影响

计算得到在不同导洞错距下,地表沉降曲线也沿着中轴线两侧呈对称分布,图 11 为工况 3-7 掌子面 错距 10 m 条件下的地层位移云图。

图 12 为不同导洞错距方案下地表沉降情况。分析可知,各错距方案下地表沉降最大值均位于中导洞 上方,地表沉降曲线呈对称分布。其中相邻导洞掌子面前后错距 10 m 时,施工引起的地表沉降最大,达 到了 18.2 mm;相邻导洞掌子面前后错距 30 m 时,施工引起的地表沉降最小,为 15.5 mm。

在"先中后边"施工顺序及预留核心土弧形开挖方式下,导洞开挖掌子面错距越大,地表沉降越小。 这是由于多导洞开挖时,在时空上会不可避免的产生群洞效应,这时地层扰动相对单个洞室开挖来说影 响很大。而掌子面错距开挖将在空间上弱化这种群洞施工效应,减小同一时空上的地层扰动,从而减小 地表沉降。



Figure 11. Surface settlement under condition 3-7 图 11. 工况 3-7 地表沉降



Figure 12. Surface settlement with different pilot tunnel stagger distances 图 12. 不同导洞错距下地表沉降

当导洞掌子面错距大于 20 m 时,地表最大沉降虽有减小但并不明显。这是由于导洞开挖纵向错距增 大时,开挖造成的扰动会减小,一定程度上弱化了群洞效应,地表沉降减小较为明显;而当纵向掌子面 间距较大时,由于掌子面应力充分释放,开挖支护的效果完全体现出来,再加上纵向错距已经很大,地 层扰动的叠加不是那么明显,故而再增大错距对地表沉降的影响也不是很大了。

#### 5.3. 不同导洞错距对支护变形影响

表 5 为不同错距下,边导洞及中导洞拱顶沉降计算结果。分析可知,导洞掌子面错距 30 m 开挖引起的拱顶沉降最小,而最大沉降出现在错距 10 m 开挖的工况,即最大边、中导洞拱顶上方围岩沉降分别达 到了 23.8 mm 和 19.3 mm;另外对比这 5 种工况发现,随着错距距离的增大,中、边导洞拱顶沉降均有 所减小,但变化并不明显,当错距距离大于 20 m 后,边导洞拱顶沉降几乎没有变化,即各工况拱顶沉降 差异很小。

此外,各工况最大地层位移均出现在边导洞拱顶,这说明在"先中后边"工序下,中导洞的先行开 挖在一定程度上扰动了周围地层,由于三个导洞之间距离很近,边导洞上方地层提前受到了扰动,致使

#### 其拱顶位移较大。

 工况编号	中导洞拱顶沉降/mm	边导洞拱顶沉降/mm
3-3	-18.2	-22.0
3-7	-19.3	-23.8
3-8	-18.9	-23.4
3-9	-18.6	-22.0
3-10	-18.3	-22.0

Table	5. Crown	settlement	for different	pilot tunnel	stagger	distances
表 5.	不同导洞	错距下拱顶	页沉降	-		

#### 6. 结语

(1) 西安地铁 8 号线小白杨站导洞自左向右依次施工过程中,最大地表沉降位于中间导洞正上方地 表。

(2) 相同导洞开挖顺序下,全断面开挖引发的地表沉降、拱顶沉降均大于弧形开挖预留核心土法施工。

(3) 导洞施工阶段地层沉降位移峰值集中在导洞拱顶附近,并略大于地表沉降峰值。

(4) 一定的错距范围内,导洞开挖掌子面错距越大,地表沉降越小。当错距大于 20 m 时,地表沉降 减小趋势已不明显。

综上,建议小白杨站导洞断面开挖方式为:导洞开挖方法选择预留核心土弧形开挖,开挖时序为"先中后边"错距 20 m 开挖。

#### 参考文献

- [1] 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, 17(3): 927-942.
- [2] 杨子璇, 姚爱军, 张东, 等. 隧道密贴下穿既有地铁车站沉降控制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S1): 442-449+464.
- [3] 赵江涛, 牛晓凯, 苏洁, 等. 洞桩法地铁车站顺行密贴下穿既有隧道方案优化研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3): 176-185.
- [4] 赵文,姜宝峰,贾鹏蛟,等. STS 管幕结合洞桩法修建地铁车站数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(4): 756-762+821.
- [5] 朱统步. PBA 工法、洞桩法的对比分析和改进措施[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(5): 88-91.
- [6] 刘加柱, 孙礼超, 张壮, 等. 地铁车站 PBA 洞桩法施工力学效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 240-247.
- [7] 周稳弟,梁庆国,张晋东. 某地铁车站洞桩法施工变形和结构受力分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 121-128.
- [8] 杜欣. 多跨大空间地铁车站暗挖施工方案比选研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(3): 66-70.
- [9] 李金奎,陈朋. 地铁车站洞桩法施工时群洞效应对比分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(14): 5737-5742.
- [10] 宗翔. 洞桩法开挖引起的地面沉降规律及实用估测方法研究[J]. 结构工程师, 2020, 36(6): 150-157.
- [11] 王秀英, 雷可, 王滕, 等. 洞桩法车站下穿既有管线工程的沉降预测[J]. 土木工程学报, 2021, 54(S1): 65-75.
- [12] 王忠良. 高寒地铁洞桩法跨既有隧道施工沉降变形分析[J]. 施工技术, 2015, 44(19): 101-105.
- [13] 陈勇华. 土体压缩模量、变形模量和弹性模量的讨论[J]. 城市建设, 2010(16): 135-136.
- [14] 王博. 黄土地区地铁车站 PBA 工法导洞形式优化分析[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(4): 117-122+129.
- [15] 任建喜,曹西太郎. PBA 法地铁车站施工诱发地表变形规律研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 88-92.
- [16] 郭亮. 黄土地区地铁暗挖车站设计方案研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(12): 65-69+78.