

文章编号: 1007-2993(2026)02-0254-09

# 不同施工方法浅埋非对称小净距隧道围岩变形规律研究

何进江<sup>1</sup> 刘洋<sup>1</sup> 蒋康<sup>1</sup> 段胜泽<sup>1</sup> 姬立杰<sup>2</sup> 张帅<sup>1</sup> 计鹏飞<sup>1</sup> 张卫中<sup>2</sup>

(1. 中铁隧道集团二处有限公司, 河北廊坊 065201; 2. 武汉工程大学资源与安全工程学院, 湖北武汉 430073)

**【摘要】** 双洞非对称断面小净距隧道常因施工方法不当产生偏压, 造成中夹岩叠加受力, 致使隧洞塌方。依托南京地铁 7 号线清凉山站工程, 采用有限元法分别对双台阶法、CD-二台阶法和双侧壁导坑-三台阶法开挖非对称小净距隧道围岩变形规律进行模拟研究, 并选出合理的施工方法。结果表明: (1) 隧道围岩最大沉降发生在拱顶位置, 拱底出现土体隆起现象。地表沉降与隧道中线位置成正比关系, 沉降曲线趋于“单峰”形态。围岩塑性区主要分布在隧道拱腰、边墙和中夹岩处, 且在中夹岩处出现贯通现象, 双台阶法开挖隧道围岩塑性区范围明显大于其它方法。(2) 三种施工方法的拱顶沉降值均为大洞>小洞。双侧壁导坑-三台阶法的大洞拱顶沉降值相比 CD-二台阶法和双台阶法分别减小了 4.33%, 24.01%, 小洞拱顶沉降分别减小了 4.95%, 11.77%; 三种施工方法地表沉降最大值由大到小为: 双台阶法、CD-二台阶法、双侧壁导坑-三台阶法。经变形控制、施工效率、经济性等多方面综合对比, 选出 CD-二台阶法为最优施工方法。(3) CD-二台阶法地表及拱顶沉降的现场监测值与模拟结果对比分析发现围岩变形规律一致。

**【关键词】** 非对称; 小净距; 施工方法; 数值分析; 围岩变形规律

**【中图分类号】** U455

**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0041

## Deformation law of surrounding rock in shallow buried asymmetric small clear distance tunnel with different construction methods

HE Jinjiang<sup>1</sup> LIU Yang<sup>1</sup> JIANG Kang<sup>1</sup> DUAN Shengze<sup>1</sup> JI Lijie<sup>2</sup> ZHANG Shuai<sup>1</sup>  
JI Pengfei<sup>1</sup> ZHANG Weizhong<sup>2</sup>

(1. China Railway Tunnel Group Second Division Co., Ltd., Langfang 065201, Hebei, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Wuhan University of Engineering, Wuhan 430073, Hubei, China)

**【Abstract】** Aiming at the problem that unreasonable construction methods for double-hole asymmetric section small clear-distance tunnels cause unbalanced loading, leading to tunnel collapse risk due to superimposed stress in the intermediate rock pillar, this study investigates the Qingliangshan Station project of Nanjing Metro Line 7. The finite element method is used to simulate surrounding rock deformation laws under three excavation methods: double-step method, CD - two-step method, and double-side wall guide pit method - triple-step method, to select an optimal construction method. The results show that: (1) Maximum surrounding rock settlement occurs at the vault, with soil heave at the arch bottom. Surface settlement is proportional to the tunnel's centerline position, and the settlement curve tends to a single-peak shape. Plastic zones are mainly distributed at the arch waist, sidewalls, and intermediate rock pillar, with potential continuity in the intermediate rock pillar; the double-step method results in significantly larger plastic zones than other methods. (2) Vault settlement values for all methods follow large tunnel > small tunnel. Compared to the CD - two-step method and double-step method, the double-side wall guide pit - triple-step method reduces large tunnel vault settlement by 4.33% and 24.01%, and small tunnel vault settlement by 4.95% and 11.77%, respectively. Maximum surface settlement ranks as: double-step method > CD - two-step method > double-side wall guide pit - triple-step method. The CD - two-step method is selected as the optimal method after comparison of deformation control, construction efficiency, economy and other aspects. (3) Field monitoring and simulation results for surface and vault under the CD - two-step method show consistent surrounding rock deformation laws.

**【Key words】** asymmetry; small clearance; construction method; numerical analysis; deformation law of surrounding rock

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174086)

作者简介: 何进江, 男, 1985 年生, 大学本科, 高级工程师, 主要从事隧道工程施工管理工作。E-mail: 23819143@qq.com

通信作者: 张卫中, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事地下空间工程和矿山安全研究工作。E-mail: wzzhang1120@126.com

## 0 引言

城市轨道交通规划过程中,为满足双线行车和右线停车扩大断面的功能需要,往往设计为双洞非对称断面小净距隧道。非对称小净距隧道由于双洞间距较小,先行隧道必然对后行隧道产生一定程度的影响。且因其非对称结构,施工时可能产生施工偏压和结构偏压,易导致施工事故<sup>[1-2]</sup>。因此,研究非对称小净距隧道围岩变形规律具有重要的工程意义。

许多学者对小净距隧道施工方法及围岩变形规律做了相关研究。一些专家学者通过对IV级围岩条件下小净距隧道不同施工方法进行的模拟研究,认为台阶法是合理的施工方法<sup>[3-5]</sup>。雷圣德<sup>[6]</sup>、王志刚<sup>[7]</sup>通过研究小净距公路隧道中夹岩柱受力特征与变形规律,揭示了中岩柱的受力机理。贾锋等<sup>[8]</sup>对软岩深埋小净距隧道开展了变形规律研究,建议软岩深埋小净距隧道采用“三台阶+两台阶”掘进的施工方案,掌子面间距50 m以上可减小两隧道的相互扰动。付大喜<sup>[9]</sup>对浅埋偏压隧道施工关键位置的受力与变形特性进行了分析,指出环形开挖预留核心土法整体效果好,施加钢管桩对控制围岩变形、减小围岩应力方面效果突出。宋战平等<sup>[10-12]</sup>、Huo等<sup>[13]</sup>依托西安某地铁非对称小净距隧道,提出了“底部双导洞超前施工”新工法,并分析了小净距隧道各施工工序相互间的影响。徐国文等<sup>[14]</sup>通过开展工法比选试验,认为复杂区域环境中的软岩隧道应适当调整围岩的预留变形量,在围岩条件很差的隧道采用三台阶法可有效控制大变形灾害。还有学者<sup>[15-18]</sup>对小净距隧道中岩柱(墙)在不同加固方式、不同施工顺序下的稳定性进行了分析,揭示了地表沉降受隧道埋深影响较大。

合理地选择开挖方法对小净距隧道围岩稳定性控制非常关键,可有效降低拱顶塌陷、地表大沉降、边墙失稳等风险。目前对于浅埋小净距隧道的围岩变形规律已经进行了大量研究,但对于非对称结构小净距隧道围岩变形规律的研究尚不完善。本文依托南京地铁7号线清凉山站隧道工程,采用数值模拟与现场实测相结合的方法,研究不同施工方法对双洞非对称断面小净距偏压隧道围岩变形规律的影响,以得到适宜的施工方案。

## 1 工程概况

南京地铁7号线清凉山站位于南京市鼓楼区广州路与虎踞路交叉口,横跨广州路布置。车站起讫里程为CK14+461.3—CK14+808.2。车站外包总长596.93 m,包括岛式站台车站和站后停车线两部分。

其中站后停车线采用矿山法暗挖,总长度430.15 m,埋深15~50 m。受线形及地形的限制,暗挖区间存在较长范围的小净距非对称截面并行隧道工况。非对称小净距隧道埋深38~45 m,左线隧道断面尺寸为12.1 m(宽)×10.6 m(高),右线隧道断面尺寸为8.5 m(宽)×9.13 m(高),双洞间距3.0 m,属于小净距双洞隧道。隧道平面示意图见图1。

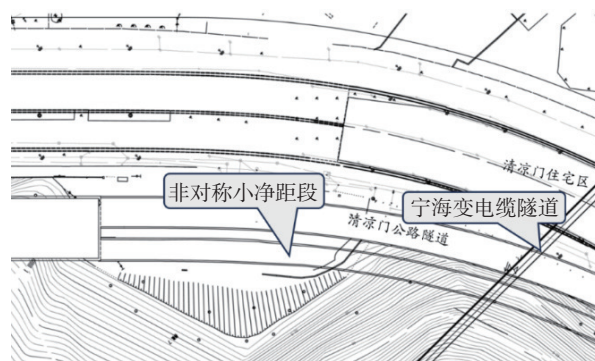


图1 非对称小净距段隧道平面位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the plan position of the tunnel in the asymmetric small-clearance section

## 2 施工方法选择与支护方案设计

### 2.1 隧道施工方法选择

结合工程实际和国内外非对称小净距隧道施工经验,研究工程选用三种组合施工方法,即双侧壁导坑-三台阶法,CD-二台阶法和双台阶法(左三台阶,右二台阶)。以“先开挖大洞,后开挖小洞”的顺序,将这三种施工方法应用到非对称断面小净距隧道模拟施工,研究非对称小净距隧道的围岩变形规律,以便选择出最优施工方法。

(1)双侧壁导坑-三台阶法施工方法的开挖步骤为:

①施工前先进行钻孔测量、注浆超前加固等准备措施,然后开挖。先开挖左隧,在左隧开挖30 m后开挖右隧。按照1#导洞、2#导洞、3#导洞、4#导洞、5#导洞、6#导洞顺序开挖模拟。

②开挖循环进尺为6 m,各导洞开挖完成后及时施作初期支护,过程中进行隧道变形监测。

③确定满足要求后,施作二次衬砌。

双侧壁导坑法-三台阶法施工方法的施工工序见图2。

(2)CD-二台阶法施工方法的开挖步骤为:

①施工前先进行钻孔测量、注浆超前加固等措施,然后开挖。先开挖左隧,在左隧开挖30 m后开挖右隧。按照1#导洞、2#导洞、3#导洞、4#导洞、5#导洞、6#导洞顺序开挖模拟。

②开挖循环进尺为 6 m,各导洞开挖完成后及时施作初期支护,进行隧道变形监测。  
 ③确定满足要求后,施作二次衬砌。  
 CD-二台阶法施工方法的施工工序见图 3。

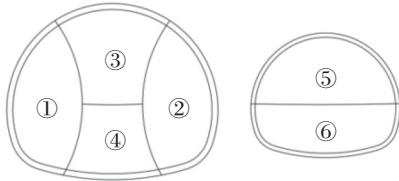


图 2 双侧壁导坑-三台阶法施工工序图  
 Fig. 2 Construction process diagram of double-side wall guide pit method - triple-step method

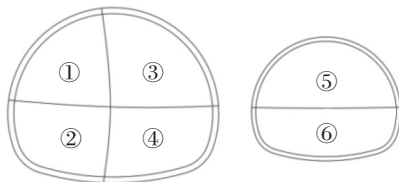


图 3 CD 法-二台阶法施工工序图  
 Fig. 3 Construction process diagram of CD method - two-step method

(3)双台阶法施工方法的开挖步骤为:

①施工前先进行钻孔测量、注浆超前加固等措施,然后开挖。先开挖左隧,在左隧开挖 30 m 后开挖右隧。按照 1#导洞、2#导洞、3#导洞、4#导洞、5#

导洞、6#导洞顺序开挖模拟。

②开挖循环进尺为 6 m,各导洞开挖完成后及时施作初期支护,进行隧道变形监测。  
 ③确定满足要求后,施作二次衬砌。  
 双台阶法施工方法的施工工序见图 4。

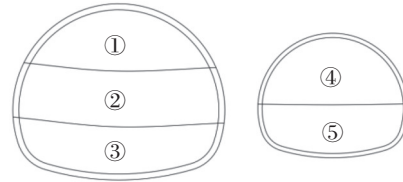


图 4 双台阶法施工工序图  
 Fig. 4 Construction process diagram of double-step method

### 2.2 隧道支护参数设计

在工程中一般会将多隧洞的支护衬砌参数设置为同等大小,在施工时更方便安全,但会导致材料浪费。因此,依据研究区隧道围岩压力计算结果、地质勘察报告及相关设计规范,参考非对称小净距地铁隧道工程支护设计经验<sup>[19-20]</sup>,对隧道左右两侧的支护结构进行非对称布置。研究区非对称小净距隧道采用初衬+防水层+二衬的复合式衬砌,隧道衬砌支护设计参数见图 5。

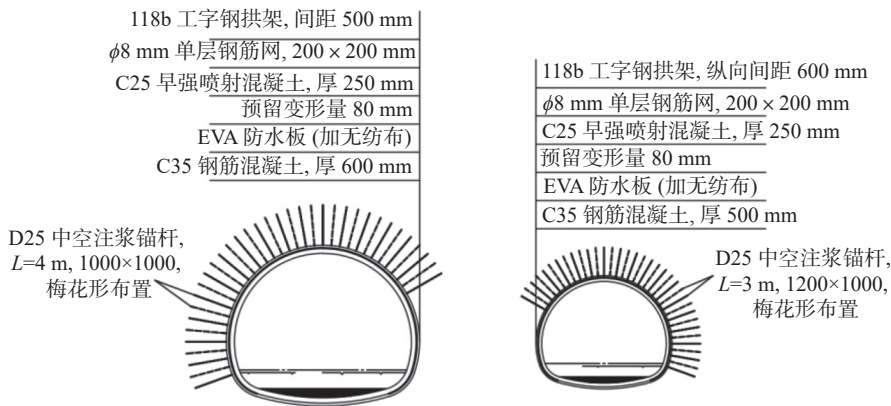


图 5 隧道设计参数  
 Fig. 5 Tunnel design parameters

### 3 不同施工方法非对称小净距隧道开挖数值模拟

#### 3.1 模型情况

利用 ABAQUS 对三种不同的施工方法建立三维模型。假定地表和各土层均质且水平层状分布,岩土体采用弹塑性 Mohr-Coulomb 本构模型,用实体单元模拟;初支选用弹性本构模型,采用三维壳单元模拟;中隔壁临时支撑选用弹性本构模型,采用三维壳单元模拟。超前小导管注浆加固做管棚加固区,材料力学参数如表 1 所示。由于初支能够确保施工期的

稳定,二衬作为安全储备用,模拟中不施作二衬。在保留非对称荷载路径、支护差异和施工扰动的前提下,为了获得更高的计算效率,实现对三种工法变形控制能力的有效对比,计算模型右洞采用圆形断面替代实际马蹄形断面。

模型取隧道左右两侧各约 3 ~ 5 倍洞径,下部取大于 3 倍洞径,上边界取至地表面。计算模型范围为 120 m × 140 m × 60 m,有限元整体模型如图 6 所示。对各地层、初期支护及中隔壁临时支撑分别施加重

表 1 岩土层及支护结构参数  
Tab. 1 Rock and soil layer and supporting structure parameters

岩土层/支护材料	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	厚度/m
填土层	20	27	0.33	13	15	3.5
粉质黏土	19.8	12	0.35	27.8	16.5	4.6
中等风化砂岩	22.5	1300	0.35	27	50	50
左加固区	30	3100	0.3	20	30	
右加固区	29	2600	0.3	20	30	
中岩墙加固	29.64	1290	0.33	31.4	58	1.5
初期支护	23	22300	0.2			0.30
支撑	25	23400	0.2			

力,竖向设置自重应力,模型上部为自由边界,四周为水平向约束,底边为双向约束,如图 7 所示。在无二次衬砌的隧道数值模拟中,地应力释放通过分阶段施加等效节点力实现:地应力初始释放(30%~50%),开挖后立即作用于围岩,模拟支护前应力重分布;初支承载(30%~40%)—激活初期支护单元时施加,由初支和中隔壁分担荷载;拆撑补偿(10%~20%)—拆除中隔壁时追加释放,最终由初支完全承担。

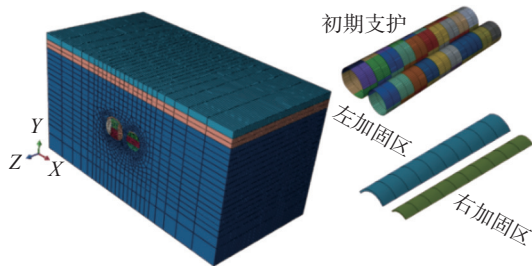


图 6 有限元模型  
Fig. 6 Finite element model

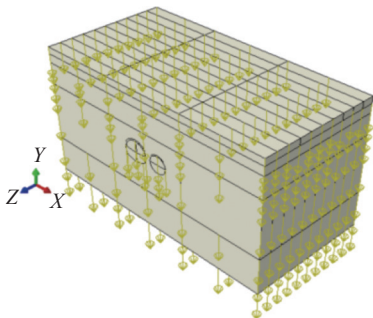


图 7 施加示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of load application

### 3.2 围岩位移变形规律分析

图 8—图 10 分别为双侧壁导坑-三台阶法、CD-二台阶法、双台阶法开挖完成后围岩的竖向位移和水平位移云图。由图 8—图 10 中(a)可知,围岩的水平位移主要集中在隧道的拱腰、边墙和中岩柱处。由图 8—图 10 中(b)可知,围岩最大竖向位移发

生在隧道拱顶处,原因在于隧道开挖形成空洞,拱顶上方土体承受了巨大的荷载,同时在隧道拱底有土体隆起。通过对比发现后行洞比先行洞的拱顶沉降要大。双侧壁导坑-三台阶法围岩最大沉降值为 14.69 mm,较 CD-二台阶法和双台阶法分别减小了 11.8% 和 19.3%。CD-二台阶法最大隆起值为 6.32 mm,较双侧壁导坑-三台阶法和双台阶法分别减小了 5.8% 和 4.1%。归因于双侧壁导坑-三台阶法和 CD-二台阶法分步开挖隧道及时进行了初期支护和临时横撑施工,使隧道初期支护与临时横撑成为一个整体,增强了围岩稳定性。

### 3.3 地表沉降变形规律分析

隧道施工完成后地表沉降变形见图 11。由图 11 可知,三种施工方法地表沉降值随施工步的进行呈现逐渐增大的趋势,在施工步的最后阶段均逐渐稳定,沉降变化规律基本一致,三种施工方法均未出现围岩失稳现象。左右隧洞中间偏右侧处地表沉降值最大,呈现“单峰”形态,曲线“峰顶”向中岩柱中心线右侧发生偏移,这是由于隧道结构非对称,后行洞施工对先行洞产生扰动,其承载了洞本身开挖的荷载和来自先行洞的部分荷载,使得沉降叠加导致峰值位置发生偏移。

通过对比可知,三种施工方法地表沉降最大值由大到小为:双台阶法(12.5 mm)>CD-二台阶法(10.75 mm)>双侧壁导坑-三台阶法(10.09 mm)。三种施工方法引起的地表沉降值均在施工安全范围内,其中双侧壁导坑-三台阶法对地表变形控制最优,CD-二台阶法次之。

### 3.4 拱顶沉降变形规律分析

通过数值计算得到了隧道左洞、右洞拱顶竖向位移随施工步的变化曲线,如图 12 所示。由图 12 可知,隧道施工完成后,双侧壁导坑-三台阶法的拱

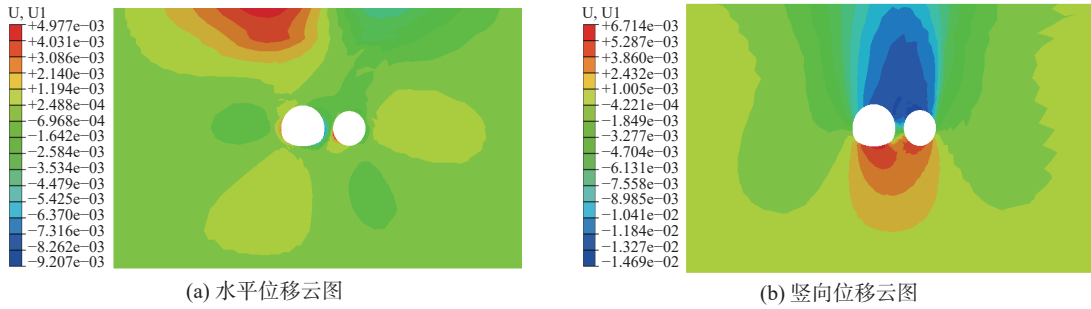


图 8 双侧壁导坑-三台阶法位移云图  
 Fig. 8 Displacement cloud diagram of double-side wall guide pit method – thiple-step method

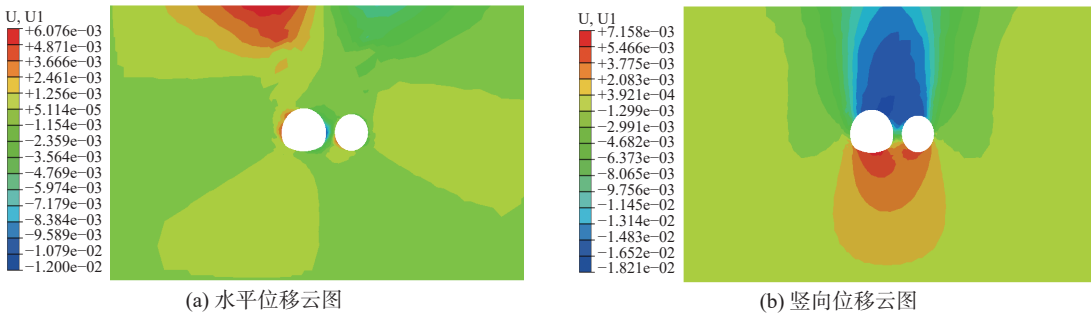


图 9 CD-二台阶法位移云图  
 Fig. 9 Displacement cloud diagram of the CD method – two-step method

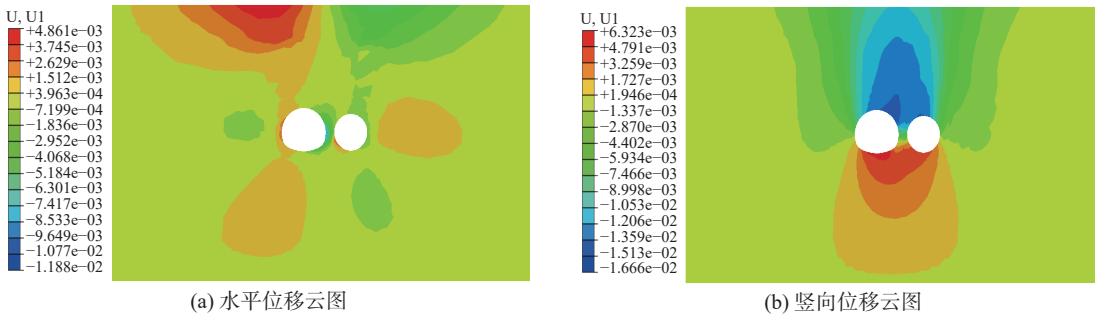


图 10 双台阶法位移云图  
 Fig. 10 Displacement cloud diagram of double-step method

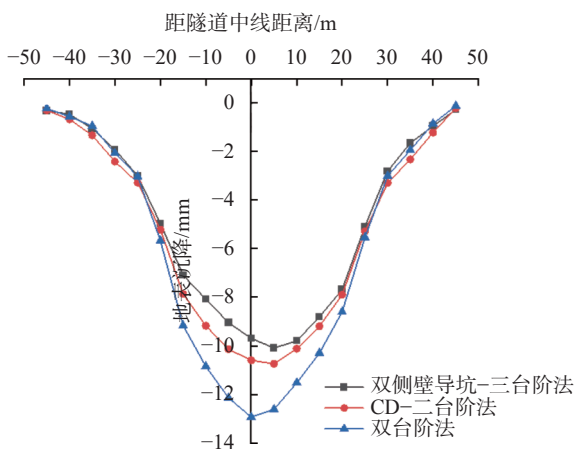


图 11 地表沉降曲线图  
 Fig. 11 Surface subsidence curve diagram

顶沉降值最小,左洞最大累计沉降量为 12.59 mm,右洞最大累计沉降量为 13.04 mm。相比 CD-二台阶

法左拱顶沉降量减小了 4.33%,右洞拱顶沉降量减小了 4.95%;相比双台阶法左拱顶沉降量减小了 24.01%,右拱顶沉降量减小了 11.77%。可以看出采用双台阶法对拱顶围岩的扰动量最大,双侧壁导坑-三台阶法和 CD-二台阶法对隧洞顶部围岩的扰动程度较小。施工结束后,三种施工方法均是大洞拱顶沉降最大,小洞拱顶沉降稍小。这是由于左洞开挖断面大,对围岩的扰动更大,承载的围岩压力也更多。左拱顶沉降在 22 施工步以后逐渐加快,右拱顶沉降在 31 施工步以后逐渐加快。由此可知,在隧道施工初期对围岩的破坏作用较小,随着施工的进行,隧道围岩强度降低,并发生塑性破坏,使得围岩变形增大。从左右两个洞拱顶的沉降曲线可以看出,在施工前期,虽然右洞还没有开挖,但是已经出现了围岩位移,这是由于左右洞室距离较近,开挖时易产生相互扰动。

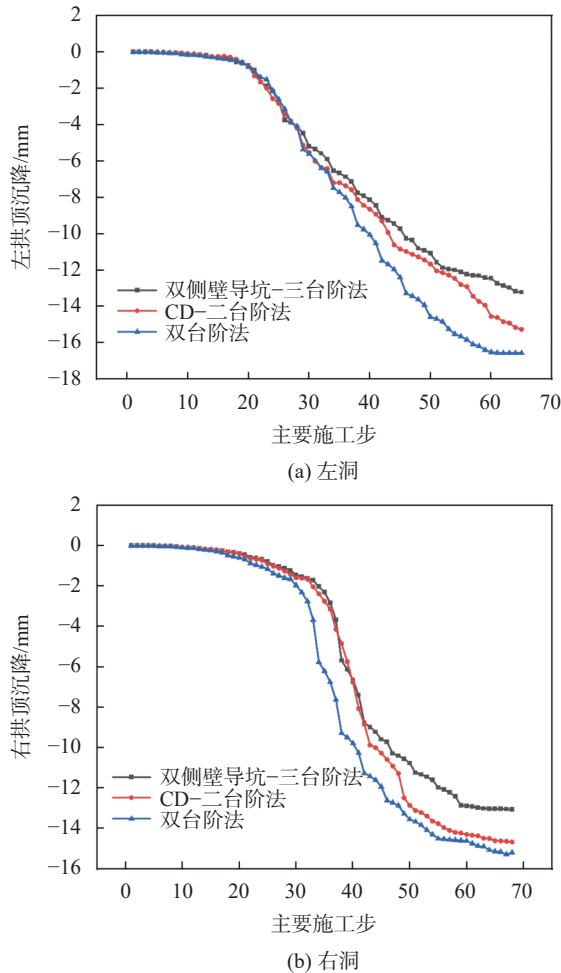


图 12 拱顶沉降曲线图

Fig. 12 The vault settlement curve diagram

### 3.5 围岩塑性区变形规律分析

隧道开挖的塑性区如图 13 所示。由图 13 可知,隧道施工完成后形成的围岩塑性变形规律是一致的,塑性区主要分布在隧洞的拱腰、边墙和中间岩柱处,中夹岩柱下部塑性区出现“连通”现象。由于大管棚和小导管的超前支护作用,隧道顶部围岩没有出现塑性区。

### 3.6 中夹岩稳定性分析

中夹岩区域水平位移显著,其中双侧壁工法峰值达 6.2 mm,因左右洞非对称开挖且左加固区弹模(3100 MPa)高于右加固区弹模(2600 MPa),位移呈明显偏态分布,后行洞侧变形量更大,CD-二台阶法水平位移差 1.8 mm;中夹岩塑性区在双台阶工法下完全贯通(见图 13(c)),而双侧壁工法因中隔壁临时支撑抑制了剪切破坏,塑性区缩减 23%,验证了临时支撑对中夹岩剪应力的有效分担;双侧壁导坑-三台阶法中夹岩沉降为 14.69 mm,其分步开挖与及时支护使应力释放率可控,而双台阶法因无中隔壁导致中

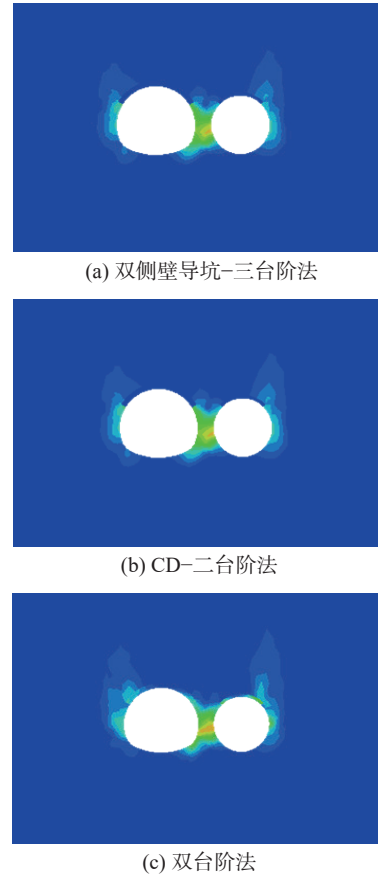


图 13 围岩塑性区分布云图

Fig. 13 Cloud map of the distribution of the plastic zone in the surrounding rock

夹岩沉降超限,达到 18.20 mm。

### 3.7 基于数值模拟分析的施工方法优选

通过对三种施工方法数值分析,得到的围岩变形模拟结果见表 2。虽然三种施工方法的围岩位移、地表沉降、拱顶下沉值均满足规范要求,但不同工法在工程适应性方面存在显著差异。为选择最优施工方法,从变形控制、施工效率、经济性等方面对三种施工方法进行了综合比选,见表 3。从表 3 可见:

(1)双台阶法虽具有工序简单、无需临时支撑、施工周期短、经济性最佳等优势,但其围岩最大沉降达 18.20 mm,地表沉降 12.50 mm,且全断面开挖导致中夹岩塑性区贯通范围最大。特别是在浅埋偏压地层中,过大的变形量可能引发地表构筑物开裂,故不适用于本工程。

(2)双侧壁导坑-三台阶法在变形控制方面最优,围岩沉降较 CD-二台阶法减少 10.5%,但其施工组织复杂,单循环需 6 个导洞转换,临时支撑数量多达 8 道。每个导洞开挖后均需单独支护,导致单循环工期达 14 d。频繁的导坑转换增加了初支结构受力体系转换风险,在狭窄的城市地下空间实施难度大。

表2 三种施工方法数值模拟结果

Tab. 2 Numerical simulation results of three construction methods

施工方法	围岩位移/mm		地表沉降/mm	拱顶沉降/mm	
	沉降	拱底隆起		左洞	右洞
双侧壁导坑-三台阶法	14.69	6.71	10.09	12.59	13.04
CD-二台阶法	16.42	6.32	10.75	13.13	13.68
双台阶法	18.20	6.59	12.50	15.61	14.57

表3 三种施工方法综合比选

Tab. 3 Comprehensive comparison of three construction methods

评价指标	围岩最大沉降/mm	地表沉降/mm	单循环施工步数	临时支撑数量/道	单循环工期/天	材料成本/(万元/m)	工序衔接难度
双侧壁导坑-三台阶法	14.69	10.09	6	8(需拆除)	14	3.8	导坑转换频繁
CD-二台阶法	16.42	10.75	5	4(部分拆除)	10	3.2	需中隔壁拆除
双台阶法	18.2	12.5	3	0	7	2.5	工序简单

(3)CD-二台阶法在变形控制与施工效率之间最为平衡。通过中隔壁分割开挖区域,将大断面转化为两个小断面施工,有效控制围岩松弛。仅需部分拆除临时支撑,单循环工期 10 d。材料成本相对较低。虽然其变形量略大于双侧壁导坑法,但仍在规范允许范围内,且通过加强监控量测可实现风险可控。

综合考量南京地铁 7 号线工期压力、地下管线密集度及城市环境敏感度,选择 CD-二台阶法既能确保变形控制达标,又可实现快速施工,避免长时间暴露工作面带来的风险,具有最优技术经济性。

#### 4 隧道变形监测结果分析

在 CD-二台阶法施工过程中对隧道进行了跟踪监测,监测点布置如图 14 所示。

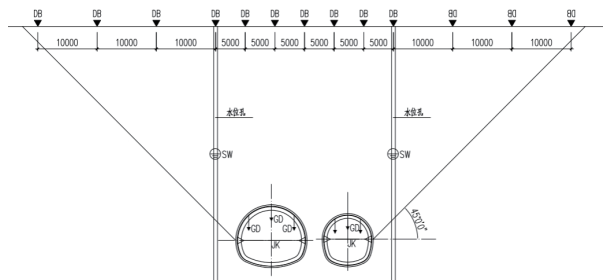


图 14 监测点布置示意图(单位:mm)

Fig. 14 Schematic layout of monitoring points (Unit: mm)

##### 4.1 隧道开挖地表沉降对比分析

选取 CK14+741、CK14+803 两个断面(见图 15)地表监测数据与数值模拟结果进行对比分析,得到了隧道开挖完成时监测值与地表竖向位移模拟值的比较结果(见图 16)。

由图 16 可知,隧道开挖直至完成,数值模拟结果和现场监测结果所得到的沉降变化规律基本吻合,

但数值模拟结果略大于现场监测结果,这是由于模拟中把二衬视作安全储备,仅做初支的原因。地表沉降曲线沿着隧道中轴线呈现对称分布,地表沉降最大值点在数值模拟结果与现场监测数据中均位于中岩柱中轴线左侧 2~3 m 范围内。数值模拟结果与现场监测数据变化规律一致,说明数值模拟结果具有可参考性。

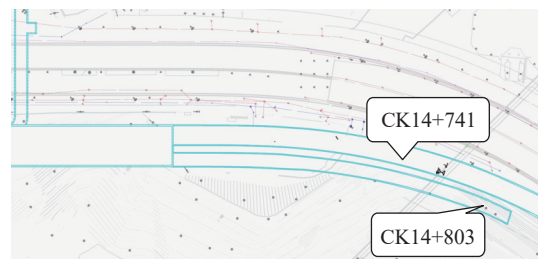


图 15 监测断面示意图

Fig. 15 Schematic diagram of monitoring section

##### 4.2 隧道拱顶沉降模拟值与监测值对比分析

隧道拱顶沉降模拟值与监测值对比如图 17 所示。由图 17 可知,开挖完成时大洞拱顶最大沉降监测值(11.23 mm)<模拟值(15.48 mm);小洞拱顶最大沉降监测值(9.31 mm)<模拟值(12.74 mm)。第 5 d 以后大洞的拱顶沉降变形模拟值和监测值均在增大,第 39, 40 d 以后趋于稳定;小洞的拱顶沉降模拟值和监测值均在第 14, 15 d 以后增大,第 35, 36 d 以后沉降变形趋于稳定,这表明拱顶沉降模拟与监测值变形规律大体一致,模拟结果具有参考性。

#### 5 结论

(1)非对称小净距隧道在掘进时存在左右洞相互扰动现象,左洞(先行洞)变形明显大于右洞(后行洞)。双侧壁导坑-三台阶法相较 CD-二台阶法和双台阶

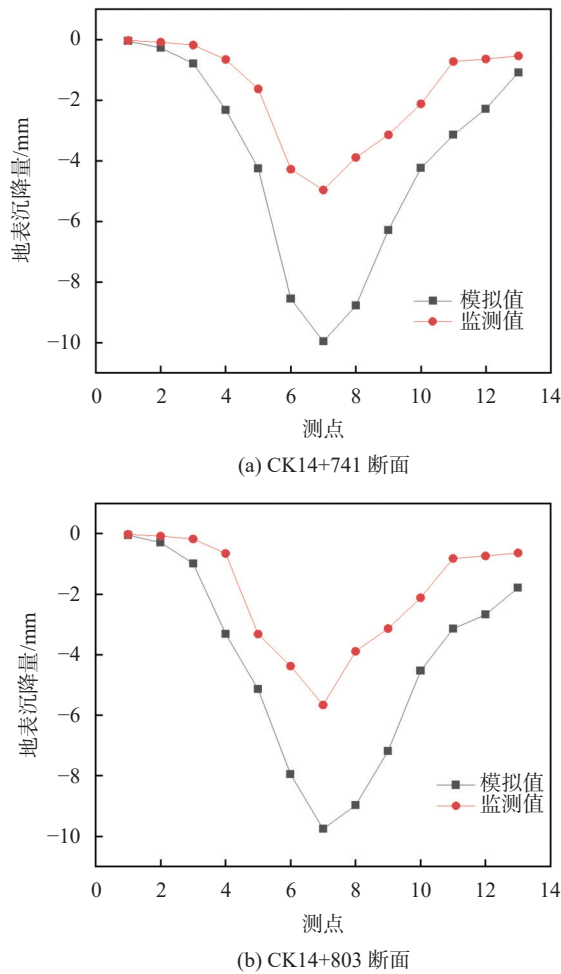


图 16 地表沉降对比

Fig. 16 Comparison of surface subsidence

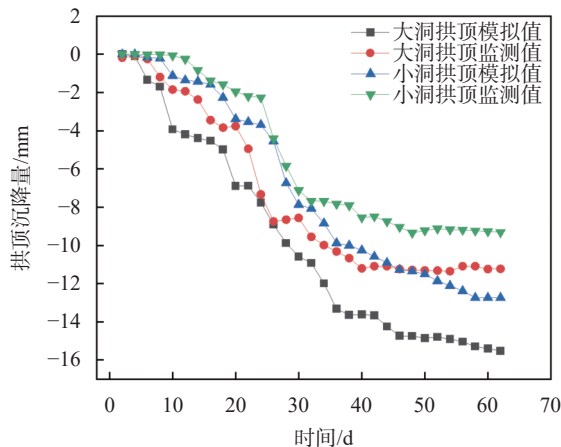


图 17 拱顶沉降对比

Fig. 17 Comparison of vault settlement

法围岩最大沉降值分别减小了 11.8% 和 19.3%。采用 CD-二台阶法开挖,围岩最大隆起值较双侧壁导坑-三台阶法和双台阶法分别减小了 5.8% 和 4.1%。在控制围岩位移方面,双侧壁导坑-三台阶法和 CD-二台阶法各有优势。

(2)三种施工方法的左洞(先行洞)拱顶沉降均先发生变化,且左洞拱顶沉降均大于右洞拱顶沉降。隧道拱顶沉降先逐渐加快,再变缓最后趋于稳定。双侧壁导坑-三台阶法的拱顶沉降值相比 CD-二台阶法开挖左拱顶沉降量减小了 4.33%,右洞拱顶沉降量减小了 4.95%;相比双台阶法开挖时的左拱顶沉降量减小了 24.01%,右拱顶沉降量减小了 11.77%。

(3)三种施工方法的左右隧洞中间右侧处地表沉降值均最大,呈现“单峰”形态。隧洞围岩塑性区主要分布在隧洞的拱腰、边墙和中间岩柱处,中夹岩柱下部塑性区出现“连通”现象。

(4)通过现场实测与数值模拟结果对比,数值模拟结果与现场监测数据变化规律一致,说明数值模拟的围岩变形规律具有参考性。

#### 参 考 文 献

- [1] 丁鸿程,吴红刚,赖天文,等.小净距隧道偏压原因及防控对策研究综述[J].工业建筑,2023,53(S2):617-622. (DING H C, WU H G, LAI T W, et al. A review of research on the causes and prevention measures of bias voltage in small clearance tunnels[J]. Industrial Construction, 2023, 53(S2): 617-622. (in Chinese))
- [2] SUN Q C, ZHANG W C, FENG G L, et al. Study on the asymmetric failure characteristics and failure mechanisms of surrounding rock during excavation of a deep buried small-clearance tunnel[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(9): 4763.
- [3] 李建林,吴金刚,毕强.大跨度小净距公路隧道设计与施工方法研究[J].现代隧道技术,2019,56(5):157-162,227. (LI J L, WU J G, BI Q. Study on the design and construction method for the large-span highway tunnel with small interval[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2019, 56(5): 157-162,227. (in Chinese))
- [4] 张其来,金立丰.大偏压小净距隧道施工方法分析[J].公路工程,2016,41(4):166-170. (ZHANG Q L, JIN L F. Analysis on reasonable construction method of steep slope tunnels with small interval[J]. *Highway Engineering*, 2016, 41(4): 166-170. (in Chinese))
- [5] 杨乾,唐俊,刘普阳,等.倾斜软硬地层中小净距隧道变形特征及施工工法研究[J].公路,2025,70(6):453-459. (YANG Q, TANG J, LIU P Y, et al. Research on deformation characteristics and construction methods of small clearance tunnels in inclined soft and hard strata[J]. *Highway*, 2025, 70(6): 453-459. (in Chinese))
- [6] 雷圣德.小净距公路隧道中夹岩柱受力特征与变形规律研究[D].重庆:重庆交通大学,2020. (LEI S C. Study on mechanical characteristics and deformation law of rock-sandwiched columns in small clear distance

- highway tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [7] 王志刚. 沙滩头隧道不同净距条件下先后行洞相互作用机理研究 [J]. 现代隧道技术, 2025, 62(1): 183-191. (WANG Z G. Study on the interaction mechanism of first and subsequently excavated Shatantou tunnel tubes under different clear distance conditions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(1): 183-191. (in Chinese))
- [8] 贾锋, 杜永强, 杨文波, 等. 不同掘进工法下软岩中深埋小净距隧道变形规律研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53(11): 21-28. (JIA F, DU Y Q, YANG W B, et al. Research on deformation laws of deeply buried tunnels with small clearance in soft rock by different tunnelling methods[J]. Industrial Construction, 2023, 53(11): 21-28. (in Chinese))
- [9] 付大喜. 浅埋偏压隧道施工方案优化及受力变形特性分析 [J]. 施工技术, 2017, 46(S1): 702-706. (FU D X. Analysis of excavation scheme optimization and stress-deformation characteristics of tunnel under unsymmetrical pressure[J]. Construction Technology, 2017, 46(S1): 702-706. (in Chinese))
- [10] 宋战平, 王双院, 苏春生, 等. 黄土层浅埋小净距非对称断面隧道施工方案优化 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2022, 54(5): 646-656. (SONG Z P, WANG S Y, SU C S, et al. Optimization of construction scheme for shallow buried tunnel with small spacing asymmetric section in loess stratum[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2022, 54(5): 646-656. (in Chinese))
- [11] SONG Z P, SHI G L, ZHAO B Y, et al. Study of the stability of tunnel construction based on double-heading advance construction method[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(1): 1-17.
- [12] SONG Z P, CAO Z L, WANG J B, et al. Optimal analysis of tunnel construction methods through cross passage from subway shaft[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 5181954.
- [13] HUO R K, ZHOU P Y, SONG Z P, et al. Study on the settlement of large-span metro station's baseplate caused by the tunnels newly built beneath it[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11(2): 1-13.
- [14] 徐国文, 何川, 代聪, 等. 复杂地质条件下软岩隧道大变形破坏机制及开挖方法研究 [J]. 现代隧道技术, 2017, 54(5): 146-154. (XU G W, HE C, DAI C, et al. Failure mechanism and excavation method for soft-rock tunnels with large deformation under complex geological conditions[J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(5): 146-154. (in Chinese))
- [15] 王海龙, 韦良文, 雷圣恩. 小净距公路隧道中岩柱对地表沉降变形规律研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41(S1): 216-222. (WANG H L, WEI L W, LEI S S. Law of ground settlement caused by middle rock pillar in highway tunnel with small clear distance[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S1): 216-222. (in Chinese))
- [16] 严石生, 傅鹤林, 宋中华, 等. 小净距隧道中岩墙稳定性分析 [J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(7): 113-117. (YAN S S, FU H L, SONG Z H, et al. Stability analysis on middle rock wall in small clear-distance tunnel[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(7): 113-117. (in Chinese))
- [17] 钟健云, 朱江伟, 张营, 等. 大跨非对称小净距隧道施工力学响应及其开挖顺序研究 [J]. 森林工程, 2025, 41(1): 174-184. (ZHONG J Y, ZHU J W, ZHANG Y, et al. Study on construction mechanical response and excavation sequence of large span asymmetric small spacing tunnel[J]. Forest Engineering, 2025, 41(1): 174-184. (in Chinese))
- [18] LIU Y, WANG Z F, WANG Y Q, et al. Investigation on the failure mechanism for surrounding rock in small interval tunnels using finite element limit analysis method[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 164: 108719.
- [19] 王小林, 张亮, 李冀伟, 等. 断面非对称小净距黄土地铁隧道施工顺序模拟对比研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2015, 18(9): 100-105. (WANG X L, ZHANG L, LI J W, et al. Comparative simulation of the construction sequence of asymmetric small clear loess subway tunnel[J]. Urban Mass Transit, 2015, 18(9): 100-105. (in Chinese))
- [20] 陈志明. 城市复杂环境下浅埋非对称小净距隧道施工方法研究 [J]. 施工技术, 2020, 49(13): 41-46, 50. (CHEN Z M. Research on construction method of shallow buried asymmetrical small interval tunnel in urban complex environment[J]. Construction Technology, 2020, 49(13): 41-46, 50. (in Chinese))

收稿日期: 2025-01-22