

# 地铁车站洞桩法双向开挖群洞力学效应研究<sup>\*</sup>

王招兵<sup>1</sup> 叱干向明<sup>1</sup> 张洋<sup>1</sup> 任建喜<sup>2</sup> 张亮<sup>2</sup> 张琨<sup>2</sup> 王蔓<sup>2</sup>

(1. 中建三局集团有限公司, 430070, 武汉; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安)

**摘要** [目的] 洞桩法多导洞施工所引发的群洞效应及马头门在破洞施工过程中的力学特性, 对暗挖车站的施工安全构成了严重威胁。因此, 有必要开展地铁车站洞桩法双向开挖过程中群洞力学效应的研究。[方法] 采用 FLAC3D 软件, 构建了洞桩法多导洞施工的三维数值计算模型。通过该模型, 分析了不同双向导洞施工顺序下, 地面的变形规律及马头门的力学特性, 并据此得出了最优的双向导洞施工顺序。[结果及结论] 洞桩法双向导洞施工的群洞效应显著, 且影响程度依次为: 双向四导洞开挖 > 双向双导洞开挖 > 双向单导洞开挖。马头门在破洞后, 其最大拉应力出现在拱底部位, 而最大剪应力则发生在侧墙和拱脚。这两者的应力水平均呈现以下趋势: 双向单导洞开挖 < 双向双导洞开挖 < 双向四导洞开挖。此外, 马头门的最大剪应力随着开挖进尺的增加, 呈现出跳跃式增大的趋势, 并在施工后期逐渐趋于稳定。从改善马头门受力状态、确保破洞安全的角度来看, 双向单导洞的施工顺序更为有利。

**关键词** 地铁车站; 洞桩法; 群洞效应; 数值模拟

**中图分类号** U231.4; U455.4

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2025.03.010

**Group-tunnel Mechanical Effect of PBA Method in Metro Stations Bidirectional Excavation**  
WANG Zhaobing<sup>1</sup>, CHIGAN Xiangming<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, REN Jianxi<sup>2</sup>, ZHANG Liang<sup>2</sup>, ZHANG Kun<sup>2</sup>, WANG Man<sup>2</sup>

(1. China Construction Third Engineering Bureau Ltd., 430070, Wuhan, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China)

**Abstract** [Objective] The group-tunnel effects induced by multi-pilot tunnel construction by PBA (pile-beam-arch) method and the mechanical characteristics of ingates during breakthrough excavation pose significant threats to the construction safety of underground metro stations. Thus, it is essential to investigate the group-tunnel mechanical effects in metro station bidirectional excavation process using PBA method. [Method] FLAC3D software is employed to establish a three-dimen-

sional numerical calculation model for PBA pilot tunnel construction. Through this model, the deformation patterns of ground and the mechanical characteristics of ingates under different bidirectional pilot tunnel construction sequences are analyzed, leading to the identification of optimal bidirectional pilot tunnel construction sequence. [Result & Conclusion] The group-tunnel effects of bidirectional PBA pilot tunnel construction are significant, with the influence degree as follows: two-way four-pilot tunnel excavation > two-way double-pilot tunnel excavation > two-way single-pilot tunnel excavation. For ingates, the maximum tensile stress after breakthrough occurs at the arch bottom, while the maximum shear stress is observed at the sidewalls and arch foot. The stress levels of both go with the following trend: two-way single-pilot tunnel excavation < two-way double-pilot tunnel excavation < two-way four-pilot tunnel excavation. Additionally, the maximum shear stress of the ingate exhibits a leap-like increase with excavation progress and gradually stabilizes in the later stages of construction. From the perspective of improving the stress state of the ingates and ensuring safe breakthrough, the two-way single-pilot tunnel construction sequence is more advantageous.

**Key words** metro station; PBA method; group-tunnel effect; numerical simulation

随着我国经济社会的高速发展,城市轨道交通已成为解决大城市交通问题的优选方案。洞桩法作为一种新型城市地铁车站施工方法,已在我国诸多工程中得到应用<sup>[1]</sup>。而洞桩法多导洞施工产生的群洞效应及破洞施工马头门的力学特征,严重威胁暗挖车站的施工安全,故研究双向开挖群洞效应对地铁车站洞桩法施工具有重要的现实意义。

学者通过结合模型试验与数值模拟的手段,深入探究了洞桩法中柱、边桩及顶拱的内力演变规律,并对边桩的横向变形特性进行了详细分析,进而构建了一套完整的洞桩法综合技术体系<sup>[2-4]</sup>。针对地面变形、群洞效应及支护结构受力等多个维

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(11872299, 12072259); 陕西省自然科学基金基础研究计划联合基金项目(2019JLP-01)

度,学者们系统研究了洞桩法施工中的群洞效应与地面沉降规律,同时剖析了塑性区的分布特征、维护结构及主体结构的受力特性,得出了管幕洞桩法在控制变形方面的优势<sup>[5-9]</sup>。这些研究成果显著推动了洞桩法技术的发展进程。然而,当前针对洞桩法双向导洞施工所引发的群洞效应及马头门力学特性的研究尚显不足,亟须加强对洞桩法双向导洞施工力学效应的研究。

本研究以西安某洞桩法车站工程为背景,构建了洞桩法双向开挖的三维数值计算模型,旨在分析双向导洞施工顺序下地面沉降变形的特征及马头门应力的变化规律,进而确定最优的双向导洞施工顺序。该研究为黄土地层中洞桩法的施工提供了一定的技术参考与支撑。

## 1 工程简介

西安某地铁车站位于快车道下方,地面交通繁忙,车流量较大。车站主体工程长约为 248.0 m,宽度约为 22.5 m,结构形式为地下二层三联拱结构。主体结构采用洞桩法施工(上层 4 个导洞和下层 2 个导洞),且上、下导洞分别采用台阶法和 CD(中隔壁开挖)法施工。施工中设置 3 个施工竖井和 3 个横通道,且在 2<sup>#</sup>横通道中可同时开展双向导洞施工。地铁车站地质剖面图如图 1 所示。

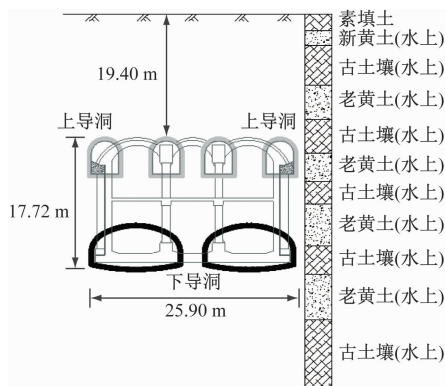


图 1 地铁车站地质剖面图

Fig. 1 Diagram of metro station stratigraphical profile

## 2 三维数值模型的建立

### 2.1 模型建立

三维数值计算模型尺寸为:130 m×125 m×80 m,模型底边和四周分别约束竖向和水平位移,土体采用摩尔-库伦模型,支护结构采用弹性模型,竖向地面超载取 20 kPa/m<sup>2</sup>。车站三维数值计算模型见

图 2。

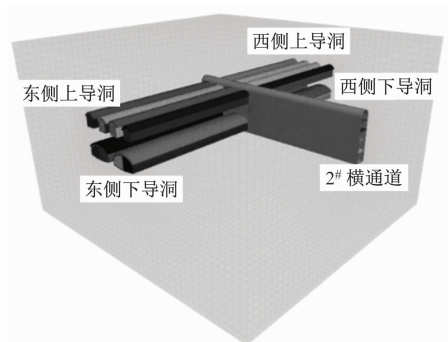


图 2 车站三维数值计算模型

Fig. 2 Metro station three-dimensional numerical calculation model

### 2.2 模拟参数

数值模拟中导洞注浆加固厚度取为 0.8 m,初期支护采用等效刚度法:

$$E = E_0 + \frac{S_g E_g}{S_0} \quad (1)$$

式中:

$E$ ——等效混凝土弹性模量;

$E_0$ ——混凝土弹性模量;

$S_g$ ——钢架截面面积;

$E_g$ ——钢材弹性模量;

$S_0$ ——混凝土截面面积。

表 1 土层及支护结构参数

Tab. 1 Parameters of soil layer and support structure

土层或 支护结构	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )
素填土	6.0	0.35	15	15.0	15.9
新黄土(水上)	14.3	0.29	20	22.5	15.9
古土壤(水上)	16.9	0.28	26	23.0	17.4
老黄土(水上)	12.9	0.28	24	21.0	17.5
古土壤(水上)	13.5	0.26	28	22.5	18.1
注浆加固体	60.0	0.28	60	35.0	22.0
初支	20 000.0	0.20			23.0
二衬	34 500.0	0.20			25.0

### 2.3 模拟工况

本次模拟采用了 3 种不同的双向导洞施工顺序,各导洞掌子面相邻距离设定为 15 m。具体施工顺序如下:

1) 工况一(双向单导洞开挖):遵循实际导洞施工顺序,首先开挖西 1<sup>#</sup>上导洞和东 4<sup>#</sup>上导洞各 15 m→开挖西 3<sup>#</sup>上导洞和东 2<sup>#</sup>上导洞各 15 m→开挖西 2<sup>#</sup>上导洞和东 3<sup>#</sup>上导洞各 15 m→开挖剩余的西

4<sup>#</sup>上导洞和东1<sup>#</sup>上导洞(如图3 a)所示)。

2) 工况二(双向双导洞开挖):开挖西2<sup>#</sup>上导洞和西4<sup>#</sup>上导洞各15 m→开挖东1<sup>#</sup>上导洞和东3<sup>#</sup>上导洞各15 m→开挖东2<sup>#</sup>上导洞和东4<sup>#</sup>上导洞各15 m→开挖西1<sup>#</sup>上导洞和西3<sup>#</sup>上导洞(如图3 b)所示)。

3) 工况三(双向四导洞开挖):开挖西2<sup>#</sup>上导洞和西4<sup>#</sup>上导洞、东1<sup>#</sup>上导洞和东3<sup>#</sup>上导洞各15 m→同时开挖西1<sup>#</sup>上导洞和西3<sup>#</sup>上导洞、开挖东2<sup>#</sup>上导洞和东4<sup>#</sup>上导洞(如图3 c)所示)。

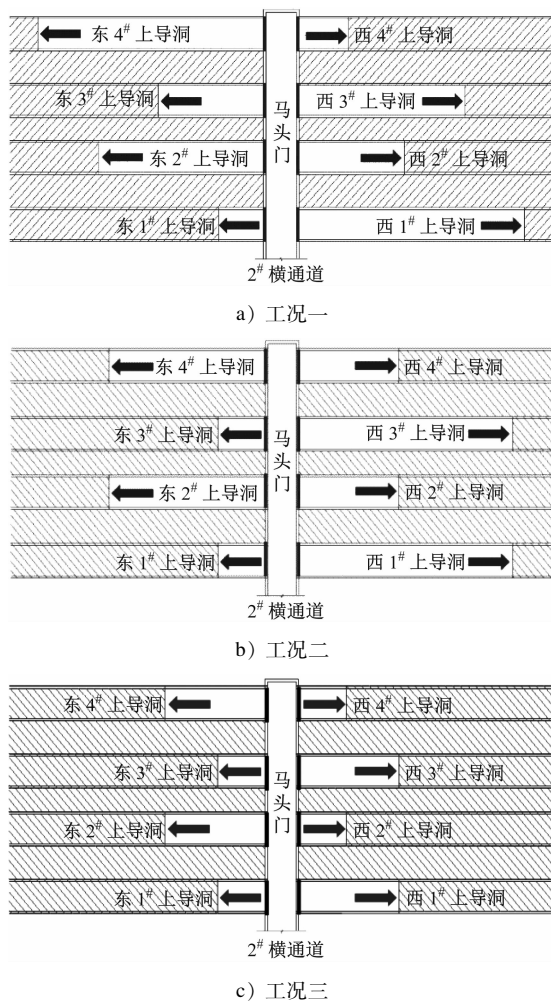


图3 上导洞开挖顺序图

Fig. 3 Diagram of upper pilot tunnel excavation sequence

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 地层沉降变形分析

图4给出不同双向导洞施工顺序下地层竖向位移云图,由图4可知导洞施工完成后,不同双向导洞开挖顺序下地面沉降变形规律大体一致,即导洞正

上方出现明显的沉降变形,且这种沉降变形自下而上逐步减小,沉降最小值发生在地面处,同时,导洞地板出现明显的隆起变形,并沿中轴线呈对称分布。

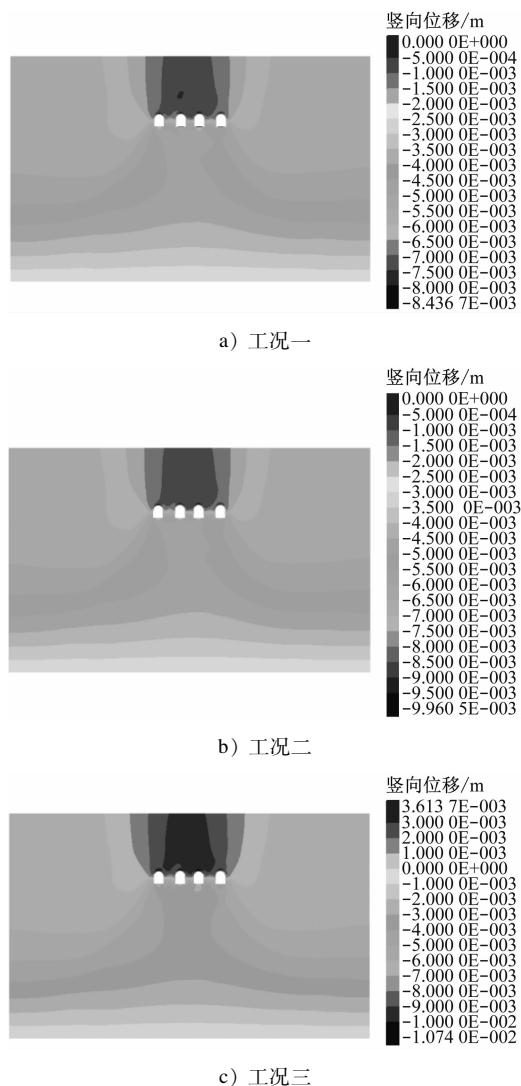


图4 导洞开挖后地层竖向位移云图

Fig. 4 Nephogram of stratum vertical displacement after pilot tunnel excavation

基于文献[10]给出的隧道开挖引起地面横向沉降槽符合高斯分布,即:

$$S = S_{\max} \exp[-y^2/(2i^2)] \quad (2)$$

式中:

$S$ ——地面计算点处的沉降值;

$S_{\max}$ ——最大地面沉降值;

$y$ ——地面计算点距隧道中线的水平距离;

$i$ ——地面沉降槽反弯点到隧道中线的距离。

图5为双向导洞开挖地面沉降槽变化曲线。由图5可知:双向导洞施工完成后,地面的沉降槽曲线



沿车站中轴线呈对称分布特征,轴线中部沉降变形最大,自中间向两边依次减小。导洞施工完成后,双向单导洞开挖引起的地面沉降较小,最大值为 8.436 mm,双向双导洞开挖次之,其最大值为 9.960 mm;双向四导洞开挖引起地面沉降最大,其值为 10.740 mm。这说明双向四导洞施工对周围地层扰动较大,地面沉降叠加效应明显,最终造成地面沉降较大。此外,3 种工况下沉降槽反弯点距中线距离分别为 15.832 mm、15.867 mm 和 17.036 mm,可知双向单导洞施工顺序对地面沉降影响范围最小,而双向四导洞开挖对地面沉降影响范围最大,因为双向四导洞同步开挖过程中,各导洞之间施工相互影响较大,群洞效应较为明显,这必然会导致地层产生更大的扰动,进而引发较大范围的地面沉降变形。

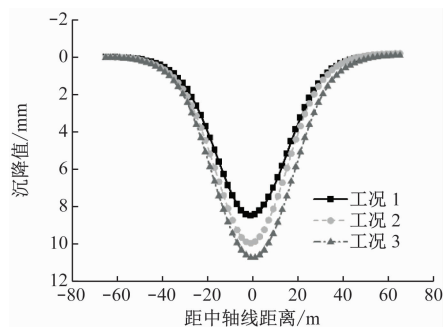


图5 地面沉降槽变化规律

Fig. 5 Variation pattern of land subsidence trough

### 3.2 马头门最大主应力分析

双向导洞同时施工过程中,围岩应力重分布会严重影响马头门的力学特征。图6为双向导洞在破洞后马头门的最大主应力云图,并将西侧各马头门最大主应力和其发生位置统计于表2。

由图6和表2可知:双向导洞破洞后,马头门最大拉应力均发生在拱底部位,而压应力最大值大多发生在拱脚和拱肩;发现双向四导洞破洞后,马头门处的最大拉应力普遍最大,双向双导洞次之,双向单导洞施工后马头门处最大拉应力最小;这是因为双向单导洞是同时向两侧施工两个导洞,且两个导洞相对距离较远,施工过程中的相互影响较小,对周围地层的扰动相对较弱,应力叠加效应小,故双向单导洞施工后马头门受力最小。

将施工过程中西侧 1#马头门最大主应力统计于表3,其随着开挖进尺的变化曲线如图7所示。

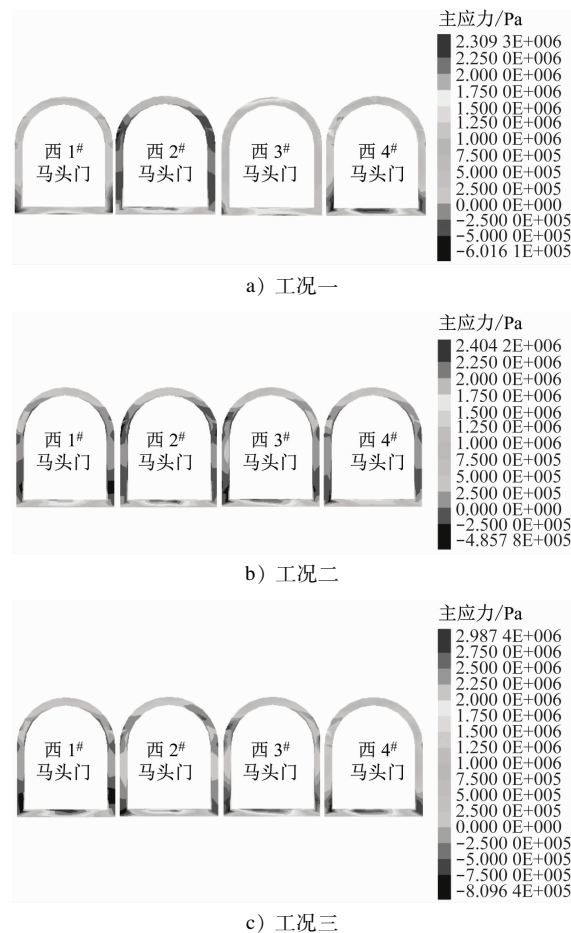


图6 导洞破洞后马头门最大主应力云图

Fig. 6 Nephogram of ingate maximum principal stress after pilot tunnel breakthrough

表2 导洞破洞后马头门最大主应力

Tab. 2 Ingate maximum principal stress after pilot tunnel breakthrough

工况	位置	拉应力		压应力	
		最大值/MPa	位置	最大值/MPa	位置
工况一	西 1# 马头门	1.411	拱底	0.474	拱脚
	西 2# 马头门	2.309	拱底	0.601	拱肩
	西 3# 马头门	1.266	拱底	0.809	拱脚
	西 4# 马头门	1.171	拱底	0.498	拱脚
工况二	西 1# 马头门	2.404	拱底	0.430	拱脚
	西 2# 马头门	2.393	拱底	0.485	拱脚
	西 3# 马头门	1.875	拱底	0.350	拱肩
	西 4# 马头门	1.890	拱底	0.326	拱脚
工况三	西 1# 马头门	3.144	拱底	0.386	拱肩
	西 2# 马头门	3.910	拱底	0.581	拱脚
	西 3# 马头门	2.534	拱底	0.510	拱肩
	西 4# 马头门	3.016	拱底	0.494	拱脚

表3 导洞施工过程中马头门最大主应力

Tab.3 Ingate maximum principal stress during pilot tunnel construction

开挖 进尺/m	最大主应力/MPa					
	工况一		工况二		工况三	
	受拉	受压	受拉	受压	受拉	受压
0	0.508	0.697	0.508	0.697	0.508	0.697
3	1.117	0.541	1.285	0.581	1.316	0.564
6	1.167	0.534	1.270	0.518	1.362	0.441
9	1.220	0.518	1.378	0.426	1.503	0.423
12	1.239	0.516	1.382	0.458	1.638	0.414
15	1.255	0.521	1.402	0.421	1.616	0.428
18	1.279	0.495	1.672	0.395	1.750	0.393
21	1.292	0.477	1.748	0.422	1.897	0.356
24	1.322	0.471	1.997	0.403	2.146	0.327
27	1.319	0.471	1.935	0.433	2.232	0.323
30	1.336	0.463	2.034	0.409	2.449	0.329
33	1.347	0.494	2.243	0.403	2.552	0.363
36	1.393	0.476	2.230	0.424	2.553	0.335
39	1.434	0.454	2.266	0.424	2.749	0.353
42	1.469	0.435	2.212	0.429	2.907	0.367
45	1.444	0.443	2.246	0.433	2.986	0.375
48	1.411	0.474	2.404	0.433	3.144	0.386
51	1.320	0.472	2.487	0.392	3.310	0.395
54	1.280	0.471	2.514	0.366	3.438	0.400
57	1.231	0.467	2.562	0.358	3.542	0.403
60	1.191	0.438	2.666	0.323	3.562	0.399

由图7和表3可知:不同开挖进尺下,双向单导洞开挖中马头门所受的拉应力最小,双向四导洞开挖中马头门拉应力最大。由图7a)可知:在导洞破洞过程中,3种工况下马头门最大拉应力均出现突然增大趋势,拉应力增大幅度分别为0.609 MPa、0.777 MPa和0.808 MPa;破洞后,随着开挖进尺的增大,双向单导洞施工中马头门最大拉应力呈缓慢增大趋势,并在最终贯通过程中略有减小,但整体趋于平缓,这种施工方案对地层扰动相对较小,马头门拉应力仅在除破洞过程中出现突增外,后期逐步趋于平缓稳定。双向双导洞施工中,马头门最大拉应力随着开挖进尺的增大,分别在进尺为18 m、33 m和48 m出现跳跃式增大,其余区段均呈逐步增大的趋势,这是因为双向双洞开挖每次同时开挖一侧两个导洞,之后以相差15 m的距离推进,相比

于双向单导洞方案,同时破除2个导洞对周围土体扰动较大,围岩产生较大的应力调整,所以最大拉应力呈跳跃式增大趋势。双向四导洞施工中,同时破除4个导洞,造成马头门最大拉应力对应进尺也出现较大突增,后期呈显著的线性增大趋势。此外,由图7b)可知压应力总体减小幅度均较小,这说明开挖进尺对马头门压应力影响较小。

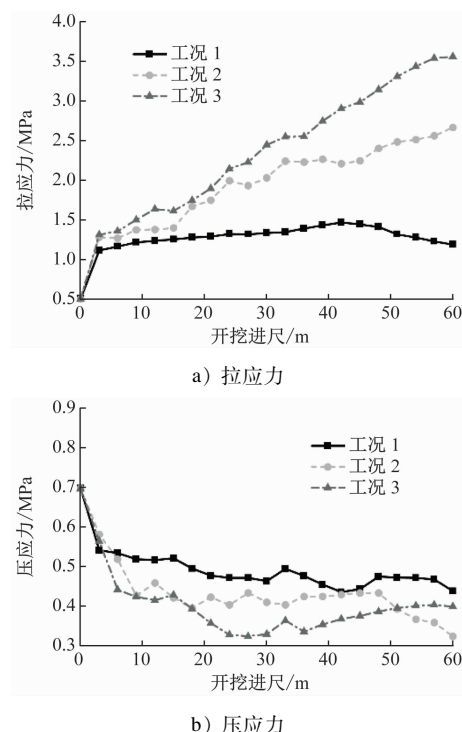


图7 马头门最大主应力随开挖进尺变化曲线

Fig.7 Variation curve of ingate maximum principal stress with excavation footage

### 3.3 马头门最大剪应力分析

图8给出不同工况下西侧上导洞破洞后马头门剪应力云图,将最大剪应力值及其发生部位统计于表4。由图8和表4可知:马头门最大剪应力大多发生于侧墙和拱脚部位,这些地方容易发生剪切破坏。在导洞全部破洞后,双向四导洞施工顺序下,马头门最大剪应力普遍最大,双向双导洞开挖次之,双向单导洞最小。

图9为马头门最大剪应力随开挖进尺的变化规律。由图9可知:马头门处最大剪应力整体表现为:双向单导洞开挖 < 双向双导洞开挖 < 双向四导洞开挖,且随着开挖进尺的增大,均呈跳跃增大的趋势,并在施工后期逐步趋于平缓。对双向单导洞开挖,在破洞过程中,最大剪应力突然增大,其增幅为1.309 MPa,而后随着开挖进尺的增大,马头门最大

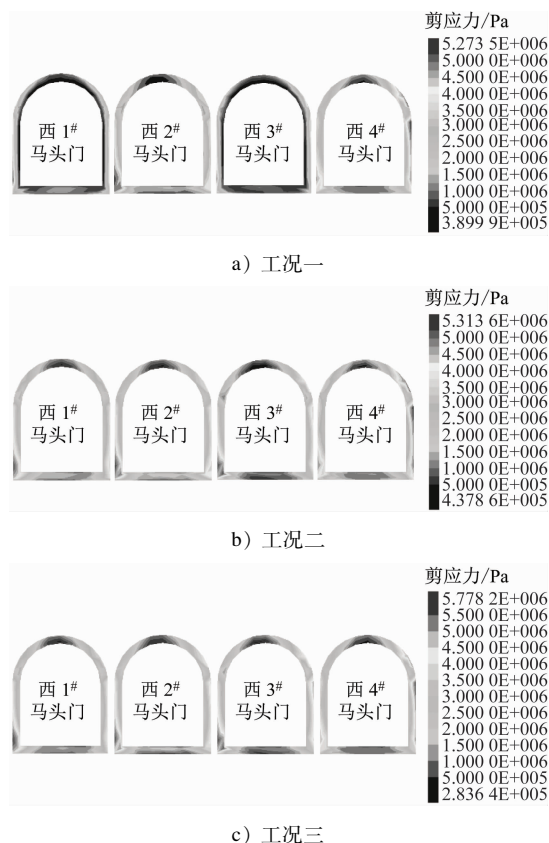


图8 导洞破洞后马头门处最大剪应力云图

Fig. 8 Nephogram of ingate maximum shear stress after pilot tunnel breakthrough

表4 破洞后马头门处最大剪应力

Tab. 4 Ingate maximum shear stress after tunnel breakthrough

工况	位置	最大剪应力	
		最大值/MPa	位置
工况一	西 1# 马头门	4.902	侧墙
	西 2# 马头门	5.060	侧墙拱脚
	西 3# 马头门	5.273	侧墙
	西 4# 马头门	4.007	拱肩侧墙
工况二	西 1# 马头门	5.092	拱脚
	西 2# 马头门	5.084	拱脚
	西 3# 马头门	5.313	拱脚
	西 4# 马头门	4.736	拱肩侧墙
工况三	西 1# 马头门	5.149	侧墙
	西 2# 马头门	5.778	侧墙拱脚
	西 3# 马头门	5.312	侧墙拱脚
	西 4# 马头门	4.934	侧墙

剪应力大致呈水平变化趋势,在开挖进尺为 33 m 时,再次出现相对较大的突增(后续西 2#和东 3#导

洞破洞引起应力调整,导致剪应力突增,见图 3 a)),其增幅为 0.407 MPa,后期再次趋于水平变化趋势,最大剪应力数值稳定在 4.4 MPa 左右;对于双向双向导洞开挖,马头门最大剪应力在导洞破洞后增幅为 1.607 MPa,后随着开挖进尺的增大,马头门最大剪应力大致呈水平变化趋势,在开挖进尺为 33 m 时,再次出现相对较大的突增,其增幅为 0.459 MPa(西 2#和西 4#导洞破洞施工所致,见图 3 b)),后期再次趋于水平变化趋势,最大剪应力数值稳定在 4.8 MPa 左右;对于双向四导洞开挖,在导洞破洞过程中,最大剪应力突然增大,其增幅为 1.644 MPa,而后随着开挖进尺的增大,马头门最大剪应力大致呈水平变化趋势,在开挖进尺为 18 m 时,再次出现相对较大的突增,其增幅为 0.575 MPa(西 2#和东 1#导洞破洞施工所致,见图 3 c)),后期再次趋于水平变化趋势,最大剪应力数值稳定在 4.9 MPa 左右。由此可知,马头门最大剪应力对于导洞破洞过程较为敏感,且在导洞破洞过程中,双向单导洞开挖中,马头门最大剪应力突变幅度最小。

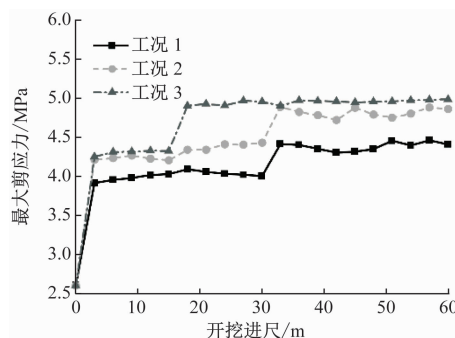


图9 马头门最大剪应力随开挖进尺变化曲线

Fig. 9 Variation curve of ingate maximum shear stress with excavation footage

#### 4 计算与现场监测对比分析

图 10 为现场监测和数值模拟沉降数据对比图。由图 10 可知:地面沉降现场监测数据变化规律与数值模拟结果基本一致,二者都沿中轴线呈明显的对称分布特征,符合文献[10]中地面横向沉降槽规律;然而,在数值上却存在较小的差异,数值模拟结果略大于现场监测数据,这是因为实际工程中导洞施工时地面环境复杂,而数值计算做了适当简化,并未考虑所有外界环境因素的影响,故二者存在较小差异,但整体变化规律一致。

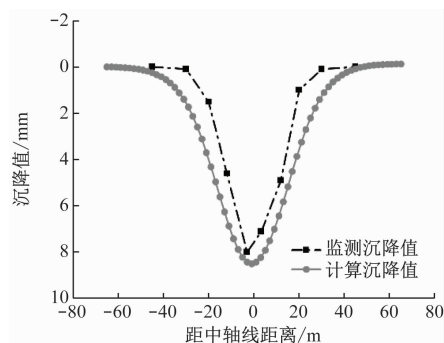


图10 现场监测和数值模拟地面沉降对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of land subsidence field monitoring and numerical simulation values

## 5 结论

1) 暗挖车站导洞施工群洞效应表现为:双向四导洞 > 双向双导洞 > 双向单导洞,且破洞后马头门最大拉应力均发生在拱底部位,双向单导洞拉应力最小。

2) 双向导洞破洞后马头门最大剪应力大都发生在侧墙和拱脚,马头门最大剪应力表现为:双向单导洞开挖 < 双向双导洞开挖 < 双向四导洞开挖。

3) 导洞破洞对马头门最大剪应力影响较大,双向单导洞、双向双导洞和双向四导洞开挖下,最大剪应力突变幅度依次减小,双向单导洞施工顺序有利于改善马头门受力状态。

## 参考文献

- [1] 杨锋. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(12): 43.  
YANG Feng. Numerical simulation analysis of surface deformation law in certain Xi'an metro station with PBA construction[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(12): 43.
- [2] 瞿万波, 刘新荣. 洞桩法隧道边桩参数对变形规律的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 258.  
QU Wanbo, LIU Xinrong. Influence of parameters on lateral displacement of piles in tunnels using PBA method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 258.
- [3] 晏启祥, 徐亚军, 刘罡, 等. 洞桩法地铁车站施工力学行为及其修正荷载-结构模型研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 165.  
YAN Qixiang, XU Yajun, LIU Gang, et al. Study on the construction mechanical behaviors of a subway station by PBA method and optimization of the load-structure model[J]. Modern Tunnel-

ling Technology, 2016, 53(6): 165.

- [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, 34(3): 87.  
WANG Mingsheng. Research on the key technique of subway station design with hole-pile method under complex environment[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(3): 87.
- [5] 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.  
FU Chunqing, LIU Bo. Study on the law of surface subsidence caused by asymmetric and uneven deformation of PBA method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(3): 927.
- [6] 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.  
LI Jinkui, CHEN Peng. Comparative analysis of group cave effect in construction of subway station by pile-beam-arch (PBA) method[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(14): 5737.
- [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.  
ZHOU Wendi, LIANG Qingguo, ZHANG Jindong. Analysis of the deformation and structural stress of a metro station constructed by pile-beam-arch method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58(6): 121.
- [8] 李铁生. 管幕洞桩法地铁车站设计施工关键技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(4): 531.  
LI Tiesheng. Key technologies for design and construction of metro station by pipe-roof PBA method[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(4): 531.
- [9] 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(增刊1): 240.  
LIU Jiazhu, SUN Lichao, ZHANG Zhuang, et al. Study on mechanical effect of PBA hole pile method construction in subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 240.
- [10] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground, state of the art report[C] // International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMGE). Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: ISSMGE, 1969: 225.

· 收稿日期:2022-11-06 修回日期:2023-05-28 出版日期:2025-03-10

Received:2022-11-06 Revised:2023-05-28 Published:2025-03-10

· 第一作者:王招兵,硕士研究生,18792938855@139.com

通信作者:张亮,讲师,liang\_zhang@xust.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license