

# 不同围岩条件小净距隧道群 TBM 掘进变形规律

杨 建<sup>1</sup>, 伏志威<sup>1</sup>, 俞 杨<sup>2</sup>, 李恒光<sup>3</sup>, 陈保国<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 2. 江苏力恒工程咨询有限公司, 江苏 南京, 210001; 3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**为研究小净距隧道群在不同围岩条件下的 TBM 开挖稳定性, 依托布吉南环路隧道工程, 采用有限元软件 Midas 建立三维数值模型, 对四导洞 TBM 开挖过程进行模拟。通过分析不同围岩等级下 TBM 掘进相互影响, 系统揭示了隧道导洞开挖各阶段变形特征, 并对模拟结果开展现场验证。研究结果表明: 1) 单导洞开挖时, 拱顶沉降与地表沉降随开挖进尺呈非线性增长趋势, 最终趋于稳定状态, 且隧道收敛变形与开挖进尺呈显著正相关; 2) 多导洞群开挖过程中, 后续导洞施工将引发已贯通导洞产生叠加效应, 具体表现为拱顶沉降、水平位移及地表沉降量呈非线性累积增长, 而水平收敛值呈非线性衰减特征, 其中 V 级围岩区段叠加效应最为显著, 导洞完全贯通时沉降量达到峰值。基于研究结果优化施工方案, 通过全过程动态调控开挖支护参数, 最终将隧道变形控制在允许范围内, 有效保障了施工安全。

**关键词:**隧道; 围岩等级; 小净距; TBM; 地表沉降; 围岩变形

中图分类号: TV554

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)08-0055-09

doi: 10.13402/j.gcejs.2025.08.102

## Deformation law of TBM excavation in small clear distance tunnel groups under different surrounding rock conditions

YANG Jian<sup>1</sup>, FU Zhiwei<sup>1</sup>, YU Yang<sup>2</sup>, LI Hengguang<sup>3</sup>, CHEN Baoguo<sup>3</sup>

(1. China Water Resources and Hydropower Seventh Engineering Bureau Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Jiangsu Liheng Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210001, Jiangsu, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China)

**Abstract:** In order to study the TBM excavation stability of the tunnel group with small clear distance under different surrounding rock conditions, relying on the Buji South Ring Road tunnel project, the finite element software Midas is used to establish a three-dimensional numerical model to simulate the TBM excavation process of the four pilot tunnels. By analyzing the mutual influence of TBM tunneling under different surrounding rock grades, the deformation characteristics of each stage of the tunnel pilot tunnel excavation were systematically revealed, and on-site verification is carried out for the simulation results. The research results show that: 1) When a single pilot tunnel is excavated, the vault settlement and the ground surface settlement show a non-linear growth trend with the excavation footage and finally tend to a stable state, and there is a significant positive correlation between the tunnel convergence deformation and the excavation footage; 2) During the excavation process of the multi-pilot tunnel group, the construction of subsequent pilot tunnels will trigger a superposition effect on the already penetrated pilot tunnels. The specific manifestations are as follows: the vault settlement, horizontal displacement and ground surface settlement show a non-linear cumulative growth, while the horizontal convergence value shows a non-linear decay characteristic. Among them, the superposition effect in the section of Grade V

收稿日期: 2024-12-02

作者简介: 杨 建(1976—), 男, 高级工程师, 从事市政工程施工技术研究与管理工。

surrounding rock is the most significant, and the settlement reaches its peak value when the pilot tunnel is completely penetrated. Based on the research results, the construction plan was optimized. By dynamically regulating the excavation and support parameters throughout the whole process, the tunnel deformation was finally controlled within the allowable range, effectively ensuring the construction safety.

**Key words:** tunnel; surrounding rock; small clear distance; tbn; ground surface settlement; deformation of surrounding rock

近年来,我国在小净距公路隧道的建设领域取得了显著进展。在施工过程中,研发了多种创新技术,如浅埋连拱隧道安全进洞技术、连拱隧道向大跨隧道转换施工技术;同时,先进钻探、掘进技术及支护方案不断涌现,如全智能化 TBM 掘进技术、超前注浆小导管支护技术,显著提升了小净距隧道施工效率和安全性。由于小净距隧道左右洞间距较小、岩柱厚度较薄,施工中岩柱易承受双向荷载,导致偏压或剪切破坏风险增加。在 TBM 掘进施工中,后行 TBM 的掘进会扰动已稳定的先行隧道围岩,引发支护结构受力重新分布。相较于常规隧道,小净距隧道在 TBM 掘进施工中的力学演化规律及围岩变形特征更为复杂,因此深入研究其掘进过程中的变形规律具有重要意义。

刘汝辉<sup>[1]</sup>针对软土地层小净距并行盾构隧道后行隧道掘进对先行隧道的影响,以宁波市软土为背景,建立了三维数值分析模型,研究了隧道不同净距条件下后行隧道掘进对先行隧道位移和管片内力的影响规律;林豪等<sup>[2]</sup>以义东高速西甑山公路隧道小净距段为工程依托,采用有限元动力分析程序 Ansys LS-DYNA 建立了小净距隧道爆破施工三维数值模型,重点研究了Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩条件下后行洞爆破施工时相邻先行洞的振动响应规律,发现在小净距隧道施工过程中,先行洞迎爆侧边墙位置的振速值最大,并得到了Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩条件下不同隧道间距产生的振动响应规律;徐晓冬等<sup>[3]</sup>以连霍高速杏花村 1 号隧道为工程背景,采用有限元软件 FLAC 对Ⅴ级围岩进行了数值模拟,分析了双侧壁导坑法和三台阶四部开挖法在隧道开挖时对位移、塑性区及初期支护应力的影响规律,提出了适用于大跨扁平超大断面隧道安全经济的开挖方法;文旭卿等<sup>[4]</sup>依托晓沅隧道工程,采用有限元软件 Abaqus 模拟了不同施工方法下超大断面的受力及变形特点,同

时将数值结果与监测数据进行了对比和验证,分析了 CRD 法、三台阶七步法、双侧壁导坑法 3 种工法及不同施工顺序的优缺点;杨迪等<sup>[5]</sup>采用数值模拟方法研究了隧道施工过程中工法转换及施工顺序对隧道围岩收敛变形的影响规律。综合现有研究可见,大断面小净距隧道施工方法仍以钻爆法为主,而针对 TBM 多导洞隧道群的力学效应及施工方案的研究相对匮乏。当前研究多聚焦于 TBM 单导洞工程,对复杂地层条件下多导洞群的相互作用及变形特性尚未形成系统性认知。

布吉南环路隧道为超大断面小净距隧道,施工采用 TBM 掘进出 4 条导洞并配合静力爆破进行扩挖的方案。隧道穿越Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级不同等级围岩,地层条件复杂。后行导洞掘进与已开挖导洞在受力变形上存在显著相互作用,其机理需结合围岩等级综合分析。本文基于该工程,建立 TBM 四导洞开挖的三维数值模型,重点分析不同围岩条件下隧道稳定性,并揭示多导洞掘进过程中的相互影响规律,以为类似隧道工程施工提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景与地质条件

布吉南环路隧道一期工程建设是深圳市罗湖区“二线插花地”棚户区改造中的关键配套市政工程,也是木棉岭、布心片区的主要区域性主干道。南环路隧道穿越蚊帐顶山的南侧,其走向接近东西方向。隧道全长 481 m,依次穿越Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩段,整个隧道坡度为 $-0.3\%$ ,最大埋深约为 62 m。隧道内部的主洞轮廓宽度为 13.66 m(双向双洞各 13.66 m),高度为 9.46 m,最大开挖断面面积达到 140 m<sup>2</sup>,最大开挖高度为 11.3 m。

该隧道地层地貌属于残丘地貌单元,总地势北高南低,自然坡度为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ ,植被覆盖茂密。经建设开挖后形成现状地貌,局部地段及进出口

段坡度陡峭,沿线地形起伏显著。场地及其周边未发现河流、河涌等地表水体。根据工程勘察报告及区域地质构造资料,场地未发现断裂构造,区域新构造运动微弱,地壳稳定性良好。勘察揭示的场地地层自下而上依次:第四系人工填土、第四系残积粉质黏土,下伏基岩为侏罗系凝灰质砂岩。其野外特征按自上而下的顺序描述如下。

(1) 杂填土:呈褐黄、灰褐色,主要由黏性土与碎石块混合组成,呈稍密状,局部松散,分布于隧道进出口段,平均厚度约为2 m。

(2) 粉质黏土:呈褐黄、褐红、褐灰色,分布不均且夹杂强风化岩块,为凝灰质砂岩风化产物,沿山岭段分布,平均厚度约为4 m。

(3) 凝灰质砂岩:为侏罗系下伏基岩,主要矿物成分包括石英、长石,含少量暗色及蚀变矿物。本次勘察揭露全、强、中、微风化4个岩性段。

根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004),将隧道围岩划分为Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ3个级别,其中左线隧道Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩长度分别为310、91、80 m;右线隧道Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩长度分别为250、111、120 m。隧道围岩分段情况如图1所示。

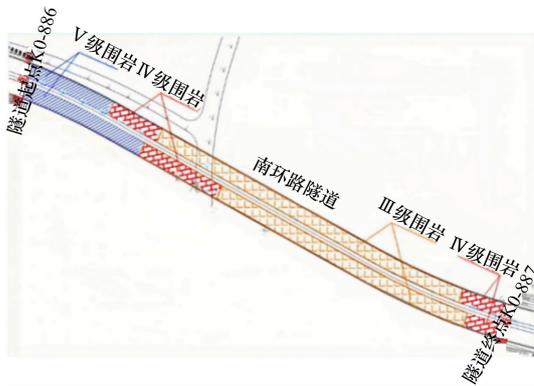


图1 南环路隧道围岩分段分布情况

## 1.2 重难点问题

布吉南环路隧道工程采用TBM掘进技术穿越不同等级围岩,地层条件复杂。TBM掘进过程中,后续导洞与已开挖导洞的施工相互影响,导致隧道围岩受力变形特性复杂。该工程在TBM导洞开挖过程中,存在的重难点问题如下。

(1) 单导洞开挖顺序对隧道稳定性影响: TBM掘进过程中,后续开挖作业会对已开挖隧道及围岩稳定性产生影响。导洞开挖顺序的不同会导致隧道周围岩石的位移变形量发生变化,并影

响岩石的应力分布。不同的开挖顺序会引起应力重分布范围和程度的变化,从而影响隧道的整体稳定性。

(2) 隧道开挖过程中4条TBM导洞之间的相互影响: 本项目隧道拟开挖4条TBM平行导洞,各导洞在TBM掘进施工过程中相互作用显著。多导洞开挖耦合作用下,隧道围岩的受力变形特性复杂,易产生应力集中现象,可能导致结构病害的发生。

(3) 不同等级围岩条件下TBM掘进过程受力变形分析: 在TBM掘进过程中,围岩会发生一定程度的变形,其大小和范围取决于围岩等级、掘进参数及支护措施等因素。在软弱破碎围岩中,围岩变形较大,可能引发掘进机卡机或隧道塌方等问题;而在坚硬围岩中,虽然围岩变形相对较小,但仍可能因掘进过程中的振动和挤压作用而产生裂缝或破碎现象。因此,在不同等级围岩条件下,TBM掘进开挖过程中的受力变形分析是一项复杂而关键的任务。

## 2 数值模拟

### 2.1 数值模型建立

鉴于3种围岩空间分布复杂且力学特性差异显著,若采用整体建模会导致数值计算规模庞大、耗时较长,故本文针对不同围岩等级分别建立独立模型。隧道三维模型基于Midas GTS NX软件构建,依据场地勘察数据与隧道设计图纸完成精细化建模(图2)。模型尺寸为80 m×15 m×100 m(X轴×Y轴×Z轴),TBM导洞直径设定为6.5 m。

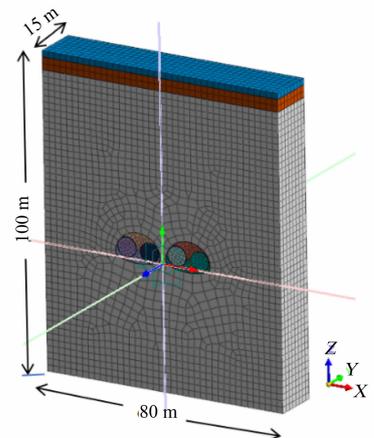


图2 数值模型

模型选取  $Z$  轴为自重方向,  $X$  轴为水平方向,  $Y$  轴为隧道延伸方向, 模型四周约束法向位移, 底部约束水平位移与竖向位移。

隧道施工采用四导洞的 TBM 静爆扩挖法, TBM 掘进每环进尺 1.5 m。考虑到围岩稳定性和施工效率, 施工采用两台 TBM 协同掘进。导洞施工顺序遵循  $3^{\#} \rightarrow 4^{\#} \rightarrow 1^{\#} \rightarrow 2^{\#}$  的路径(图 3): 首先, 第一台 TBM 开始掘进  $3^{\#}$  导洞; 随后, 第二台 TBM 启动掘进  $4^{\#}$  导洞, 待  $3^{\#}$  导洞贯通后, 第一台 TBM 转场至  $1^{\#}$  导洞继续掘进;  $4^{\#}$  导洞贯通后, 第二台 TBM 转场至  $2^{\#}$  洞进行掘进。

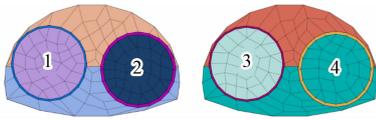


图 3 TBM 导洞编号

$1^{\#}$ 、 $3^{\#}$  导洞开挖后采用预制管片衬砌, 并在管片与隧道间隙进行豆粒石注浆填充, 其中管片厚度为 0.35 m, 豆粒石注浆层厚为 0.15 m。 $2^{\#}$ 、 $4^{\#}$  导洞不设置管片衬砌, 采用敞开式 TBM 施工, 其初期支护主要围绕“锚、网、喷”3 道工序进行。根据施工图、现场开挖揭露的围岩类别和 TBM 掘进参数及时调整支护方案, 确保开挖后全环喷射混凝土的质量。TBM 四导洞模型如图 4 所示。

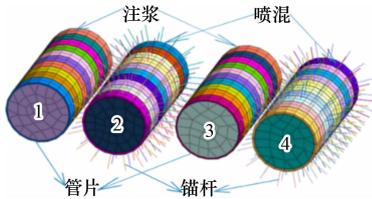


图 4 TBM 四导洞模型

## 2.2 材料本构及参数

预制管片采用 C35 混凝土, 分为 6 块错缝拼装。考虑到接缝对接的影响, 弹性模量按照 85% 进行折减。喷射混凝土采用 C25, 锚杆选用直径为 25 mm 的 HRB400 钢筋。各土层及围岩均选取 Mohr-Coulomb 本构模型, 管片、喷射混凝土和锚杆采用线弹性模型。盾构管片采用板单元模拟, 锚杆采用植入式桁架单元, 豆粒石注浆层和喷混层采用实体单元。鉴于实际地层围岩分级分段及开挖施工过程的复杂性, 忽略各级围岩交界面处的相互影响, 并将模型按照 III、IV、V 围岩等级分别计算, 土层及其他材料参数如表 1 所示。

## 2.3 模拟工况设置

(1) 工况 1:  $S_0$ , 初始应力状态, 激活所有土层、自重及边界荷载等, 模拟土体在未施工情况下的自然状态, 并进行位移初始化。

(2) 工况 2:  $S_1 \sim S_{10}$ , TBM  $3^{\#}$  导洞开挖土体, 逐环开挖, 每环 1.5 m, 共计开挖 10 环。

(3) 工况 3:  $S_2 \sim S_{11}$ , TBM  $3^{\#}$  导洞每开挖 1 环后, 逐环铺设管片, 并在管片与导洞间的空隙处进行豆粒石注浆填充。

(4) 工况 4:  $S_{12} \sim S_{21}$ , TBM  $4^{\#}$  导洞开挖土体, 逐环开挖, 每环 1.5 m, 共计开挖 10 环。

(5) 工况 5:  $S_{13} \sim S_{22}$ , TBM  $4^{\#}$  导洞每开挖一环后, 逐环进行喷锚支护施工。

(6) 工况 6:  $S_{23} \sim S_{32}$ , TBM  $1^{\#}$  导洞开挖土体, 逐环开挖, 每环 1.5 m, 共计开挖 10 环。

(7) 工况 7:  $S_{24} \sim S_{33}$ , TBM  $1^{\#}$  导洞每开挖 1

表 1 土层及其他材料物理力学参数

名称	容重/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角/( $^{\circ}$ )	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa	泊松比
杂填土	19.0	17.0	25.0	11.4	0.30
粉质黏土	20.0	23.7	23.6	13.7	0.35
III 级围岩	25.0	40.0	1 200.0	45 000.0	0.28
IV 级围岩	23.0	35.0	400.0	12 000.0	0.33
V 级围岩	20.0	26.0	100.0	4 500.0	0.40
管片	25.0	—	—	26 775.0	0.20
盾壳	78.5	—	—	210 000.0	0.30
豆粒石注浆	20.0	—	—	17 500.0	0.30
C25	24.0	—	—	28 000.0	0.20
Q235	78.5	—	—	210 000.0	0.30

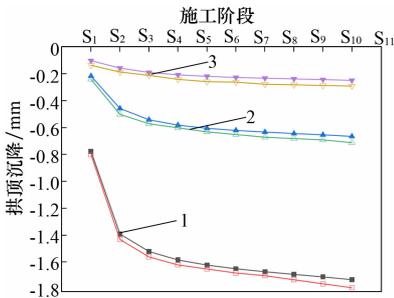
环后,逐环铺设管片,并在管片与导洞间的空隙处进行豆粒石注浆填充。

(8) 工况 8:  $S_{34} \sim S_{43}$ , TBM2<sup>#</sup>洞开挖土体,逐环开挖,每环 1.5 m, 共计开挖 10 环。

(9) 工况 9:  $S_{35} \sim S_{44}$ , TBM2<sup>#</sup>导洞每开挖 1 环后,逐环进行喷锚支护施工。至此,4 个 TBM 导洞全部贯通。

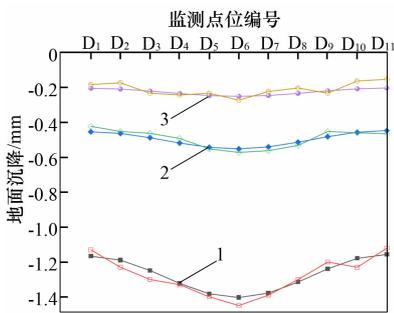
## 2.4 数值模型验证

选取南环路隧道起点处断面 K0 + 406, 对比分析不同等级隧道围岩条件下单 TBM 导洞开挖过程中导洞拱顶沉降, 以及各 TBM 导洞贯通时的地面沉降实际监测与数值计算变化情况, 对比结果如图 5、6 所示。由图 5、6 可知: 实际监测沉降数据与数值模拟结果的变化规律一致, 二者数值



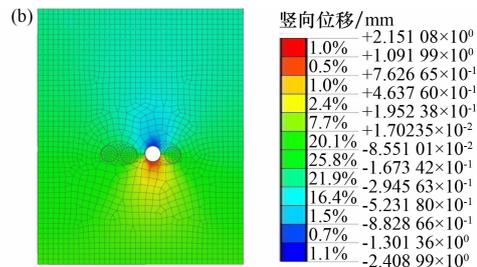
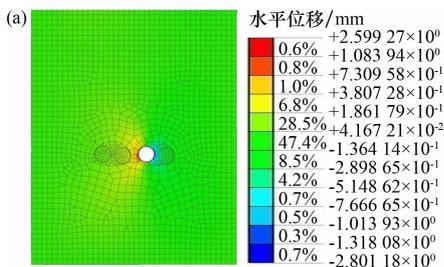
1—V级围岩; 2—IV级围岩; 3—III级围岩。

图 5 拱顶沉降模拟结果与监测数据对比



1—V级围岩; 2—IV级围岩; 3—III级围岩。

图 6 地面沉降模拟结果与监测数据对比



方向: (a) 水平; (b) 竖直

图 7 TBM3<sup>#</sup>导洞开挖位移变形云图

接近, 最大误差不超过 10%, 表明本文所建立的数值模型合理可行, 结果可靠。

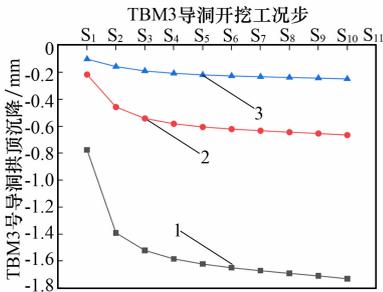
## 3 数值模拟结果分析

### 3.1 单导洞 TBM 掘进变形特性

以 TBM3<sup>#</sup>导洞开挖为例, 首先通过模拟计算得到 V 级围岩条件下 3<sup>#</sup>导洞贯通时的变形结果, 如图 7 所示。由图 7 可知: TBM3<sup>#</sup>导洞开挖完成后, 岩土体应力部分释放, 导致导洞周围岩体发生收敛位移。围岩水平方向变形主要集中分布在导洞拱腰处, 拱腰处围岩最大水平位移为 1.69 mm, 水平收敛值为 3.19 mm, 相对收敛值为 0.52‰, 水平位移从拱腰处向上下两侧逐渐减小; 竖直方向上变形主要集中在隧道拱顶和拱底处, 拱顶处围岩最大沉降量为 1.74 mm, 底部最大隆起值为 1.46 mm。开挖过程中的隧道围岩变形满足规范要求。

在 III、IV、V 级围岩条件下, 通过对 3<sup>#</sup>导洞 TBM 掘进开挖过程进行模拟, 得到各开挖步骤对应的拱顶沉降规律, 如图 8 所示。由图 8 可知: 随着 3<sup>#</sup>导洞逐环开挖, 拱顶沉降值总体呈现出非线性增长的趋势, 并逐渐趋于稳定。其中,  $S_1 \sim S_3$  工况下的沉降值增幅最大, 主要原因是从  $S_2$  步骤开始逐环铺设管片并进行豆粒石注浆填充, 前两环施工阶段围岩荷载对导洞拱顶沉降值产生较大影响; 而从  $S_3 \sim S_{10}$  的后续阶段, 沉降值增长缓慢并逐渐趋于稳定。研究还发现, 在单个导洞开挖过程中, 隧道收敛变形受到开挖进尺的影响, 与开挖进尺呈正相关关系。此外, 围岩等级对导洞拱顶沉降量有显著影响。TBM 在性质较差的 V 级围岩中掘进时引起的拱顶沉降量远大于在 III 级和 IV 级围岩中的情况。隧道开挖引起的位移变化是一个随开挖顺序逐渐发展的过程。初期, 由于

土体卸载和自重的影响,位移变化较快;随着工况的推移,围岩体产生应力重分布,位移变化速度逐渐减慢并趋于稳定。各级围岩在开挖过程中的变形均能满足规范要求,但在导洞掘进过程中需要根据围岩性质的变化及时调整支护方案以确保安全和稳定性。



1—V级围岩; 2—IV级围岩; 3—III级围岩。

图8 不同围岩条件下TBM3<sup>#</sup>导洞开挖导洞拱顶沉降

## 3.2 导洞群TBM掘进相互影响规律

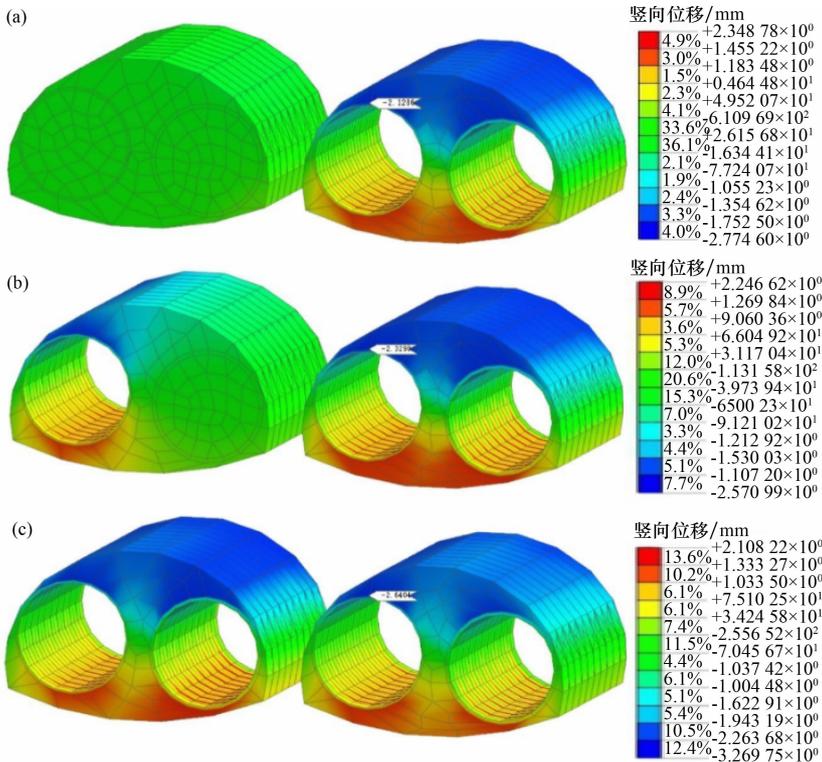
### 3.2.1 导洞群竖向位移

以V级围岩条件下的TBM导洞开挖为例,分析4条TBM导洞掘进时的竖向位移分布规律。其中,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>导洞贯通时的竖向位移分布规律云图如图9所示。在III、IV、V级围岩条件下,其

他3条导洞开挖对3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降的影响规律如图10所示,图10中主要提取了各导洞第一、第五、第十环开挖步对应的3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降结果。

由图10可知:3<sup>#</sup>导洞贯通后,后续3条导洞继续掘进开挖对3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降产生了显著影响。3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降值随其他导洞的开挖呈现非线性增大的趋势,且围岩级别越差,影响效果越明显。在V级围岩条件下,4<sup>#</sup>导洞贯通时,3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降值达到2.13 mm,相较于3<sup>#</sup>导洞单独贯通时增加了22.4%;1<sup>#</sup>导洞贯通后,3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降值增长至2.33 mm,相比3<sup>#</sup>导洞单独贯通时增大了33.9%;2<sup>#</sup>导洞完全贯通后,3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降达到最大值2.64 mm,增加幅度达到51.7%。

导洞拱顶沉降量和底部隆起量与导洞所处围岩条件密切相关,在不同围岩条件下开挖造成的导洞拱顶沉降和底部隆起存在明显差异(图11)。由图11可知:在III级围岩条件下,导洞掘进过程中围岩变形量较小,隧道的底部拱起值和顶部沉降量为3种围岩中最小,最大竖向位移值分别为0.29、0.45 mm;在V级围岩条件下,由于围岩本身强度较差,开挖过程中产生的变形较大,隧道



导洞编号: (a) 4<sup>#</sup>; (b) 1<sup>#</sup>; (c) 2<sup>#</sup>

图9 V级围岩中各TBM导洞贯通时竖向位移云图

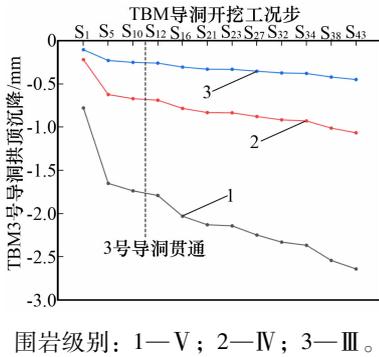


图 10 各级围岩下各导洞开挖对应 3#导洞拱顶沉降

底部隆起量和顶部沉降量为 3 种围岩中最大, 最大值分别为 1.77、2.64 mm; 而在 IV 级围岩条件下, 围岩强度介于 III 级和 V 级之间, 底部隆起值和顶部沉降量的最大值分别为 0.67、1.06 mm。由此可见, 在 V 级围岩条件下相同工况下的导洞拱顶沉降明显高于 III 级和 IV 级围岩。

### 3.2.2 导洞群收敛变形分析

数值模拟计算得到的 V 级围岩条件下 TBM 导洞群围岩水平位移云图如图 12 所示, 不同工况下各导洞围岩收敛值如表 2 所示。由表 2 可知: 各导洞贯通时围岩收敛值并不相同, 这是由于导洞开挖后, 围岩压力会重新分布, 在此过程中围岩应力经历调整并最终趋于稳定。从后开挖导洞对先贯通导洞的影响程度来看, 4#导洞贯通时 3#导洞水平收敛值为 2.92 mm, 相较于 3#导洞自身贯通时减少了 8%; 1#导洞贯通时 3#围岩收敛值为 2.84 mm, 相较于 3#导洞贯通时减少了 11%; 2#导洞贯通时 3#导洞围岩收敛值减少了 12%。各导洞贯通过程中, 3#导洞围岩水平收敛值呈非线性连续减小的趋势, 这一结果表明, 先开挖导洞的围岩收敛值会受到后开挖导洞施工的影响, 后开挖的导洞可能对已贯通导洞的围岩收敛产生一定的“卸载”效应, 导致其收敛值减小。

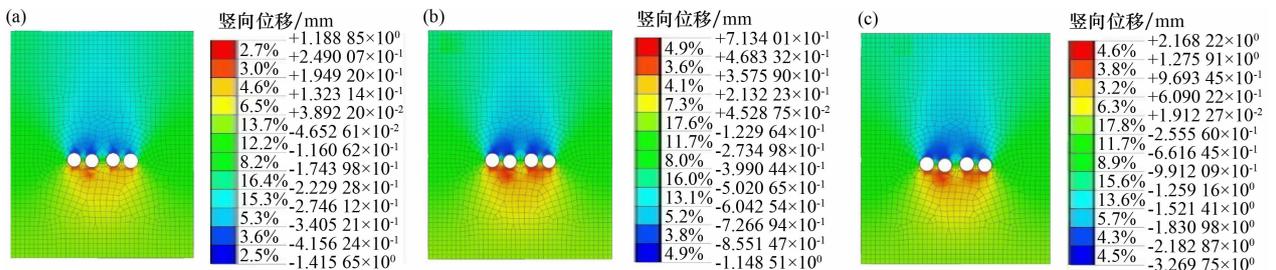
在不同围岩条件下开挖造成的围岩收敛值存在较大差异。模拟结果还发现: 在 III 级围岩条件下, 四导洞群贯通后围岩收敛值较小, 最大值仅为 0.28 mm; 在 V 级围岩条件下, 由于围岩强度较差, 四导洞群贯通后围岩收敛值最大达 2.78 mm; 而 IV 级围岩的强度介于 III 级和 V 级围岩之间, 四导洞贯通后最大收敛值为 1.36 mm。由此可见, 在 V 级围岩条件下各导洞围岩收敛值明显高于 III 级和 IV 级围岩。

表 2 不同工况各导洞围岩 (V 级) 收敛值 mm

导洞编号	3#导洞贯通	4#导洞贯通	1#导洞贯通	2#导洞贯通
3	3.19	2.92	2.84	2.78
4	—	2.05	2.02	2.02
1	—	—	3.08	2.41
2	—	—	—	2.54

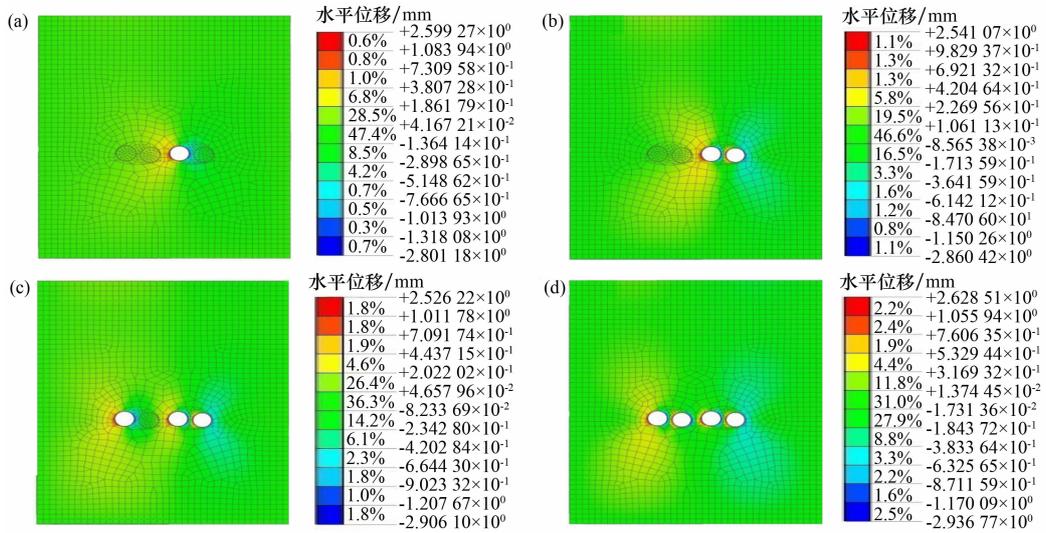
### 3.2.3 地面沉降规律

数值模拟得到的 3 种围岩条件下各导洞开挖完成时的地面沉降曲线如图 13 所示。首先进行的 3#导洞掘进会导致其上方岩土体受到扰动, 拱顶下沉, 从而产生地面沉降。此时, 最大地面沉降点位于 3#导洞正上方; 随着 4#导洞的掘进, 产生的土体扰动和应力释放进一步影响导洞上方的土体。由于 4#导洞位于 3#导洞的右侧, 其掘进导致上方土体向右侧移动, 从而使得地面最大沉降点从 3#导洞上方向右偏移。然而, 1#和 2#导洞的掘进也会对上方岩土体产生扰动, 这些掘进活动引起的拉伸效应与 3#、4#导洞掘进产生的沉降规律相互叠加, 导致上方岩土体向左侧移动, 从而使地面最大沉降点向左偏移, 并且沉降值持续增大。当 4 条 TBM 导洞全部贯通后, 岩土体内部的应力重分布趋于稳定, 此时地面最大沉降点位于 4 条导洞中线附近。



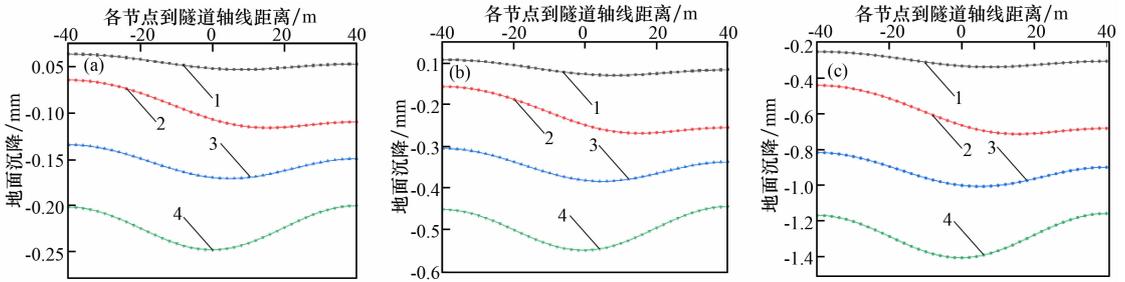
围岩级别: (a) III; (b) IV; (c) V

图 11 各级围岩下导洞贯通时围岩竖向位移云图



导洞编号: (a) 3<sup>#</sup>; (b) 4<sup>#</sup>; (c) 1<sup>#</sup>; (d) 2<sup>#</sup>

图 12 各导洞贯通时围岩水平位移云图



不同级别: (a) III; (b) IV; (c) V

导洞编号: 1—3<sup>#</sup>; 2—4<sup>#</sup>; 3—1<sup>#</sup>; 4—2<sup>#</sup>。

图 13 TBM 各导洞开挖完成时地面沉降

TBM 导洞按照设定工况逐环、逐洞开挖,在各导洞开挖过程中,导洞之间相互影响的机理较为复杂。总体来看,地面沉降随着各导洞开挖贯通呈现出明显的叠加作用,沉降量逐渐增大;地面最大沉降点的位置随各导洞的开挖顺序而发生偏移。此外,在不同围岩等级中,TBM 掘进引起的地面沉降差异较大;在 III 级围岩中掘进时,引起的地面沉降相对较小,最大值为 0.24 mm;而在 V 级围岩中掘进时,引起的地面沉降值最大达 1.40 mm。

## 4 结论与建议

(1) TBM 单导洞开挖过程中,拱顶沉降值总体上呈现出非线性增长的趋势,并逐渐趋于稳定。隧道收敛变形与开挖进尺呈正相关关系。在 V 级围岩掘进过程中,拱顶处围岩最大沉降量为 1.74 mm,底部最大隆起值为 1.46 mm,水平收敛值为 3.19 mm,

相对收敛值为 0.52‰。开挖过程中的隧道围岩变形满足规范要求,但拱顶沉降量、底部隆起和水平收敛值均远大于 III 级和 IV 级围岩条件下的值。

(2) TBM 导洞群开挖过程中,后续各条导洞的掘进对已贯通的导洞围岩变形会产生较大影响,并出现叠加效应,其位移随其他导洞开挖呈现非线性增大趋势。在 V 级围岩条件下,4<sup>#</sup>导洞贯通时,3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降值增加了 22.4%;1<sup>#</sup>导洞贯通后,3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降值增加了 33.9%;2<sup>#</sup>导洞贯通后,3<sup>#</sup>导洞拱顶沉降增幅达到 51.7%。相同工况下,V 级围岩条件下的导洞拱顶沉降明显高于 III 级和 IV 级围岩。在隧道实际开挖施工过程中,应充分考虑导洞间的相互影响、围岩条件的差异以及施工过程中的动态变化,采取科学合理的施工方案和监测手段。

(3) 后开挖的导洞对已贯通导洞的围岩水平收敛产生一定的“卸载”效应,先开挖导洞围岩

水平收敛值随其他导洞开挖呈现非线性减小的趋势。不同围岩条件下开挖造成的围岩收敛值存在较大差异。在实际施工过程中,应根据不同等级围岩的特点和应力情况设计针对性的施工及支护方案,以减小地层差异对围岩水平收敛的影响。

(4) 地面沉降随着各导洞开挖贯通呈现出明显的叠加作用,沉降量逐渐增大;地面最大沉降点位置随各导洞的开挖顺序而发生偏移。此外,在不同围岩等级中,TBM掘进引起的地面沉降差异较大。在实际工程中,需要密切关注地面沉降差,必要时应采取相关的工程措施以确保隧道周边环境的安全。

### 参考文献:

[1] 刘汝辉. 软土小净距并行盾构隧道后行掘进对先行

隧道的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2024,45(3):7;61-68.

[2] 林豪,郭洪雨,兰庆男,等. 大断面小净距隧道爆破施工合理间距及减振措施[J]. 公路交通科技,2024,41(6):165-172.

[3] 徐晓冬,刘杰,段彦福,等. 连霍高速杏花村1号大跨扁平超大断面隧道开挖方案研究[J]. 科学技术与工程,2023,23(28):12258-12264.

[4] 文旭卿,徐松,徐长节,等. 超大断面隧道施工方法模拟与工序分析[J]. 水利水电技术(中英文),2024,55(增刊2):426-434.

[5] 杨迪,钱坤,董建军,等. 超大断面公路隧道工法转换施工力学特征研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(增刊1):216-223.

(上接第54页)

[2] ANAGNOSTOU G,KOVÁRI K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,1994,9(2):165-174.

[3] 吕玺琳,王浩然,黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定极限理论研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):57-62.

[4] DAVIS E H,GUNN M J,MAIR R J,et al. The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material[J]. Geotechnique,1980,30(4):397-416.

[5] LECA E,DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. Géotechnique,1990,40(4):581-606.

[6] SOUBRA A H. Kinematical approach to the face stability analysis of shallow circular tunnels[C]//8th International Symposium on Plasticity. Vancouver;HAL,2000.

[7] 李得建,赵炼恒,杨峰,等. 非线性破坏准则下浅埋隧道掌子面三维被动稳定性能耗分析改进方法[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(4):743-752.

[8] 张光武. 基于筒仓理论的近接断层掌子面稳定分析模型[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(增刊2):

663-668.

[9] 姚聪,杨小礼. 基于非关联流动法则的盾构隧道掌子面稳定性上限分析[J]. 矿冶工程,2016,36(4):26-29.

[10] 陈仁朋,李君,陈云敏,等. 干砂盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):117-122.

[11] 赵勇,李术才,赵岩,等. 超大断面隧道开挖围岩荷载释放过程的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增刊2):3821-3830.

[12] 秦建设,虞兴福,钟小春,等. 黏土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土力学,2007,28(增刊1):511-515.

[13] 王俊,何川,王闯,等. 砂土地层土压盾构隧道施工掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(1):177-185.

[14] 郑震宙,王迪,龚斌文,等. 淤泥地层内顶管顶进对上覆土体及管线的影响[J]. 工程建设,2021,53(3):1-6.

[15] 王炜,刘锋涛,周锡文,等. 基于光滑有限元的隧道掌子面稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报,2024,20(2):606-614.