

# 上方基坑施工引起新运营隧道变形与病害分析

刘继强<sup>1</sup>, 朱旻<sup>2,3\*</sup>, 郝琨<sup>4</sup>, 陈登伟<sup>1</sup>, 陈湘生<sup>2,3</sup>

(1. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518060; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060; 3. 深圳大学 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东 深圳 518060; 4. 中铁四局集团电气化工程有限公司, 安徽 蚌埠 233000)

**摘要:** 花岗岩残积土层基坑施工极易引起下方盾构隧道产生上浮变形和结构病害。该文依托深圳地区深基坑长距离上跨新运营地铁隧道施工案例, 建立三维有限元模型, 研究了深基坑开挖引起下方盾构隧道上浮量和水平收敛变化规律, 并对衬砌结构纵向受力和病害相关性进行分析。结果表明: 基坑卸载引起的隧道变形以整体上浮为主, 断面变形为辅。采用跳仓开挖并对隧道拱顶上方土体进行抽条加固后, 隧道上浮量平均减小了14.4%, 围护结构侧移减小了49.1%。上方卸载造成的盾构隧道病害主要为集中于拱顶的环缝掉块, 分析原因为拱顶环缝接头在弯矩-剪力共同作用下, 内侧混凝土产生压剪裂缝并逐渐发展。

**关键词:** 盾构隧道; 基坑开挖; 上浮; 结构病害; 数值计算; 花岗岩残积土

中图分类号: U455

文献标志码: A

## Deformation and Damage Characteristics of a Newly Operated Tunnel Caused by above Foundation Pit Construction

LIU Jiqiang<sup>1</sup>, ZHU Min<sup>2,3\*</sup>, HAO Kun<sup>4</sup>, CHEN Dengwei<sup>1</sup>, CHEN Xiangsheng<sup>2,3</sup>

(1. China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518060, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China; 3. Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructure, Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China; 4. Electrical Engineering Co., Ltd. of CTCE Group, Bengbu, Anhui 233000, China)

**Abstract:** The construction of foundation pits in granite residual soil layers is prone to causing upheaval deformation and structural damage in shield tunnels below. Based on the engineering case of a newly operated metro tunnel collinear with the above long-distance deep foundation pit in Shenzhen, a three-dimensional finite element model was established to investigate the variation law of the heave and horizontal convergence of the shield tunnel caused by the deep foundation pit excavation. The correlation between the longitudinal stress of the lining structure and the damage was analyzed. The results indicate that the tunnel deformation caused by foundation pit unloading is primarily vertical heave, accompanied by slight section deformation. After adopting the jump excavation method and the stripped soil reinforcement above the tunnel crown, the average tunnel heave is reduced by 14.4%, and the lateral displacement of the envelop enclosure is reduced by 49.1%. The shield tunnel damage caused by the above unloading is mainly the spalling at the circumferential joints of the tunnel crown. The reason is that the compressive shear cracks occur and expand on the intrados of the circumferential joints of the tunnel crown under the combined action of bending moment and shear.

**Keywords:** shield tunnel; foundation pit excavation; heave; structural damage; numerical calculation; granite residual soil

收稿日期: 2024-04-26 (修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (编号: 52008263, 51938008, 52090084); 中国中铁股份有限公司2020年度科技开发计划重点项目 (编号: 2020-重点-14)

作者简介: 刘继强, 男, 博士, 正高级工程师. E-mail: liujqztnf@163.com

\*通信作者: 朱旻, 男, 博士, 副研究员. E-mail: zhuminfnf@163.com

## 0 引言

近年来,随着超大城市开发密度不断增大,在既有隧道周边进行基坑开挖的工程案例逐渐增多,对隧道结构和地铁运营安全的影响不容忽视<sup>[1-4]</sup>。目前国内外学者针对基坑开挖对邻近地铁盾构隧道影响问题,一般采用理论解析<sup>[5-7]</sup>、数值仿真<sup>[8-10]</sup>、现场实测分析<sup>[11]</sup>和模型试验<sup>[12]</sup>等方法,从盾构隧道变形特征和上浮量预测、隧道周围水土压力演变规律及隧道变形控制理论和技术等多个角度开展了一系列研究并积累了丰富成果。

花岗岩残积土为花岗岩物理风化后原地残积产物,广泛分布在中国华南地区,其理化性质和结构特征复杂,遇水易软化崩解<sup>[13]</sup>。深圳地铁隧道主要位于花岗岩残积土层,因此更容易受基坑卸载影响。陈拴等<sup>[14]</sup>基于Winkler地基模型提出了上方基坑开挖下土-隧道相互作用解析模型,并采用深圳某残积土层基坑长距离上跨隧道的工程实测数据验证了模型合理性;Zhu等<sup>[15]</sup>基于深圳地铁1号线注浆修复案例,研究了基坑施工引起残积土层隧道病害发展情况,并定量评价了注浆修复效果;Meng等<sup>[16-17]</sup>结合深圳桂庙路工程实测数据,分析了上方基坑施工引起盾构隧道长期变形规律以及上浮量和卸载比的关系,并建立有限元模型,研究了基坑施工过程中的土拱效应形成机制。目前,关于花岗岩残积土层盾构隧道上方基坑施工的实测资料有限,尚不能充分揭示隧道变形机理,亟待进一步研究。

本文结合深圳花岗岩残积土层深基坑长距离上跨新运营地铁隧道施工的工程案例,建立Plaxis三维有限元模型,分析基坑施工全过程隧道上浮、水平收敛的变化规律,并和测量机器人与三维激光扫描实测结果进行对比验证,在此基础上进一步研究隧道衬砌结构纵向受力和结构病害分布的关联规律。

## 1 工程概况

### 1.1 基坑方案

深圳地铁某隧道于2020年8月正式开通运营,2020年7月在隧道上方进行基坑开挖施工。由于基坑施工期间地铁刚开通试运营,干扰因素较少,因此可以更加准确分析基坑施工对隧道的影响。如图1所示,基坑长369.3 m,标准段宽32.0 m。图2为基坑

典型断面(19轴),基坑开挖深度13.77 m,采用明挖法施工,围护结构为800 mm厚地下连续墙,深度20.77 m;支撑体系采用1道钢筋混凝土支撑+1道钢支撑+1道钢支撑换撑,混凝土支撑为800 mm×1 000 mm,间距6 m,钢支撑为直径609 mm、厚度16 mm的钢管,间距3 m(换撑间距6 m)。地铁隧道在基坑下方且两者长距离共线,隧道纵向坡率1%,隧道顶部距离基坑的距离为3.8~7.5 m。采用直径600 mm,间距800 mm旋喷桩对隧道顶部土体进行加固,加固深度为基坑底至隧道顶面以上1 m,考虑到南侧隧道埋深较浅,因此南区南侧80 m范围(5轴~13轴)采用满堂加固,其余部分(13轴~45轴)采用抽条加固,加固范围为左、右线隧道轴线两侧各5 m宽度内,纵向抽条加固范围6 m,间隔10 m。

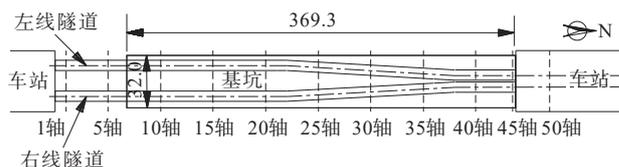


图1 基坑和隧道位置关系(单位:m)

Figure 1 Locations of foundation pit and tunnel (unit:m)

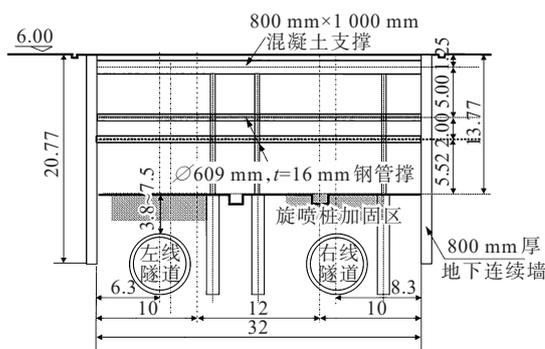


图2 基坑典型断面图(单位:m)

Figure 2 Typical foundation pit section (unit:m)

基坑土方开挖采用竖向分层、纵向分段及跳仓的方式进行开挖,同时底板锚固临时抗拔桩,地下连续墙作为抗浮压板形成整体抗浮体系。当土方开挖到第2道支撑顶标高+0.05 m时,停止开挖并立即进行旋喷桩加固,随后继续开挖并施作第2道支撑。之后进行分段跳仓开挖,跳仓长度不小于80 m,分段长度为6~9 m,进尺速度宜控制小于3 m/d,放坡比例为1:1,采用喷射混凝土+钢筋网片护坡。

### 1.2 地质条件

图3为南北向地质剖面图,地层自上而下分别为人工填土、砾质黏性土、全风化花岗岩和强风化花岗岩,主要土层的物理力学指标汇总于表1。基坑负一层以下基本位于砾质黏性土层中,而盾构隧道在1轴~25轴主要穿越砾质黏性土层,25轴~45轴主要穿越全风化花岗岩层。场地内地下水根据赋存介质类型,主要分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。

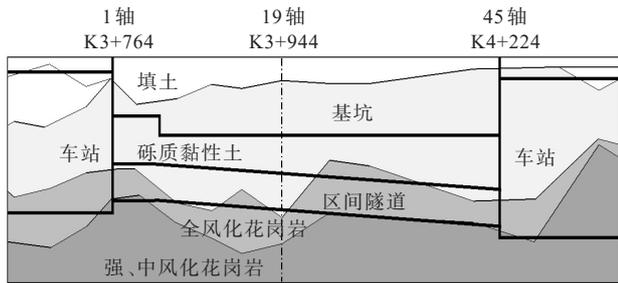


图3 地质剖面图

Figure 3 Geological profile

表1 地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

地层	重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	饱和重度/ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	含水 率/%	渗透系数/ ( $m \cdot d^{-1}$ )	标贯击 数/击
素填土	19.1	19.7	24.2	0.3	14.0
砾质黏性土	18.0	18.8	27.8	0.5	25.3
全风化花岗岩	18.3	19.1	25.3	0.5	53.8
强风化花岗岩	18.7	19.5	22.8	2.0	—

### 1.3 隧道监测方案

(1) 通过测量机器人对衬砌结构的水平和竖向位移进行监测,左、右线隧道K3+764~K4+194每间隔10 m设置一个监测断面,每个断面在两侧拱腰、轨道板和拱顶处共布置5个监测棱镜(图4),采用测量机器人[型号Leica TS30,测角精度 $\pm 0.5''$ ,测距精度 $0.6 \text{ mm} \pm 1.0 \times 10^{-6} D$ , $D$ 为测量距离(km)],监测频率1次/d。

(2) 采用三维激光扫描仪[型号Leica ScanStation P40,测角精度 $8''$ ,测距精度 $1.2 \text{ mm} \pm 10 \times 10^{-6} D$ , $D$ 为测量距离(km)]对左、右线K3+764~K4+194全长进行扫描,得到盾构隧道各环管片的整体收敛变化情况。扫描仪设置为高速模式,分辨率 $3.1 \text{ mm} @ 10 \text{ m}$ ,隧道理论半径 $R=2.7 \text{ m}$ ,站间距32 m,经过室内验证和全站仪的测量,误差在 $\pm 2 \text{ mm}$ 以内。

(3) 采用高清拍照系统(型号ScanTubes,配置有12台工业相机),对左右线隧道K3+820~K4+194区间每隔0.75 m拍照1次,并输出隧道高清环形展开图,可以识别宽度大于0.3 mm的平面缺陷,包括裂缝、掉块、渗水等。

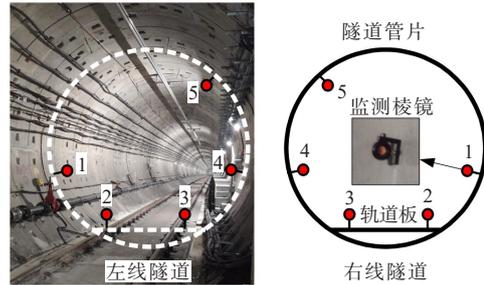


图4 监测棱镜布置图

Figure 4 Layout of monitoring prisms

## 2 有限元模型

### 2.1 模型概况

基坑和隧道长距离共线,整个开挖过程近似平面应变问题。为了研究分步开挖的影响,选择19轴为中心的一个开挖段(15轴~23轴共80 m)进行建模分析。为减小边界影响,南北方向各扩展2轴,实际建模范围为13轴~25轴。采用Plaxis 3D软件建立如图5所示三维有限元模型。模型几何尺寸为 $132 \text{ m} \times 120 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ,其中 $x$ 方向两侧模型边界距离基坑地下连续墙均为50 m,大于3倍基坑开挖深度; $z$ 方向底部为中风化花岗岩层,保留了花岗岩原岩特征,物理力学性质好,可有效减小模型边界对计算结果的影响。模型四周边界限制水平位移,底部边界限制水平和竖向位移;四周和顶部边界均设置为自由排水边界,底部设为不透水边界,水位线位于地表以下3 m。

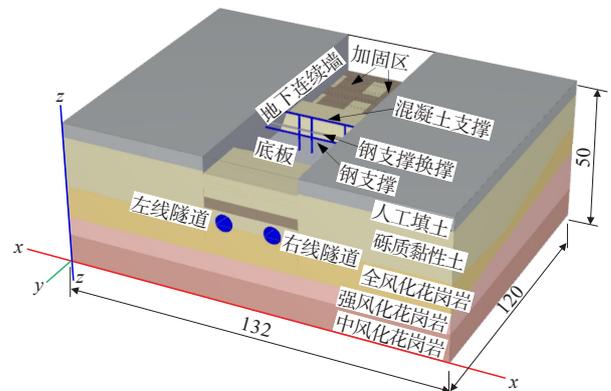


图5 有限元计算模型(单位:m)

Figure 5 Finite element calculation model (unit:m)

模型土层自上而下为素填土、砾质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩和中风化花岗岩,平均厚度分别为5.0 m、16.9 m、7.4 m、10.7 m和10.0 m。地下连续墙深度20.77 m,基坑开挖深度13.77 m。

2.2 材料参数

2.2.1 地层参数

人工填土和中风化花岗岩本构模型选用摩尔-库仑模型,参数见表2。砾质黏性土、全风化花岗岩和强风化花岗岩为影响基坑和隧道变形的主要土层,本构模型选用硬化土模型(Hardening Soil, HS),参数见表3。砾质黏性土和全风化花岗岩的强度参数参考文献[18-19]原状样室内试验和现场孔内剪切试验确定;考虑到花岗岩残积土为一类结构性强的特殊土,取样过程扰动大,其刚度参数不宜按照室内三轴试验确定,因此砾质黏性土的刚度参数参照文献[20-21]通过自钻式旁压试验(SBPT)反演获得,全风化花岗岩的刚度参数根据砾质黏性土的刚度参数值和表1中的平均标贯击数、深度值修正获得。旋喷桩加固后的全风化花岗岩力学参数参考文献[22]中的旋喷加固残积土层参数取值。

表2 摩尔-库仑模型参数

Table 2 Mohr-Coulomb model parameters

地层	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	$E/\text{MPa}$	$\nu$
素填土	0	30	0	28	0.35
中风化花岗岩	200	45	10	1 000	0.20

注: $c'$ 为有效黏聚力; $\varphi'$ 为有效内摩擦角; $\psi$ 为剪胀角; $E$ 为弹性模量; $\nu$ 为泊松比。

表3 硬化土模型参数

Table 3 Hardening soil model arameters

编号	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\psi(^{\circ})$	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{oad}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$	$m$	$R_f$
砾质黏性土	30	26	5	25	25	75	0.83	0.92
全风化花岗岩	40	30	3	30	30	90	0.72	0.89
强风化花岗岩	60	45	5	80	80	240	0.50	0.90
加固土	60	40	0	100	100	300	0.50	0.90

注: $E_{50}^{\text{ref}}$ 为三轴压缩试验的参考割线模量; $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 为固结试验的参考切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载再加载参考割线模量; $m$ 为刚度应力水平相关幂指数; $R_f$ 为破坏比。

2.2.2 结构参数

模型中的结构参数汇总于表4,盾构隧道衬砌的横向刚度有效率取0.7,纵向刚度有效率取1/6,界面系数 $R_{\text{inter}}$ 取0.65。

表4 结构参数

Table 4 Structural parameters

结构类型	尺寸	单元类型	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$R_{\text{inter}}$
隧道衬砌	$D=6\text{ m},$ $t=0.35\text{ m}$	板单元	24.2/横向 5.75/纵向	0.2	0.65
连续墙	$t=0.8\text{ m}$	板单元	30	0.2	1.00
底板	$t=1.0\text{ m}$	板单元	30	0.2	1.00
混凝土撑	$0.8\text{ m}\times 1.0\text{ m}$	梁单元	30	0.2	—
钢撑	$D=0.609\text{ m},$ $t=0.016\text{ m}$	梁单元	210	0.3	—
钢立柱	$A=0.4\text{ m}^2$	梁单元	210	0.3	—

注: $D$ 为直径; $t$ 为厚度; $A$ 为截面面积; $R_{\text{inter}}$ 为界面系数。

2.3 施工工况和分析步

有限元模型各分析工况对应的分析步设置汇总于表5。共计算两种工况:工况1:按照设计的施工方案,在第3、4层开挖时采用分段开挖,分段长度为6~9 m,每段开挖完成后及时施作底板并换撑;工况2:采用整体开挖方案,第3、4层土分别一次性开挖完成后施作全部底板并换撑。基坑开挖分析步中,地下水随挖随降,最终坑内水位下降至基坑底,考虑到地层渗透性较好,因此采用稳态渗流下的排水分析。

表5 有限元分析步设置

Table 5 Steps of finite element analysis

分析步	工况1 (设计施工顺序)	工况2 (一次性开挖)
1	地应力平衡	
2	隧道施工	
3	施作围护结构和立柱桩	
4	第1层开挖(1.4 m)	
5	施作混凝土支撑	
6	第2层开挖(3.0 m)	
7	旋喷桩加固	
	8-1 第3层第1段开挖(2.6 m)	8-1 一次性开挖第3层
	8-2 施作钢支撑	8-2 一次性施作钢支撑
8	8-3 第4层第1段开挖(6.77 m)	8-3 一次性开挖第4层
	8-4 施作第1段底板并换撑	
9	重复第8步直至第16段底板和换撑施工完成	施作全部底板并换撑

3 结果分析

3.1 衬砌结构上浮

图6为有限元计算和现场实测得到的盾构隧道的上浮量对比,其中3、5号测点分别位于轨道板和拱

顶,全部开挖完成后,由于隧道埋深自西向东逐渐增加,并且地层风化程度逐渐降低,因此隧道上浮量逐渐减小。全部开挖后实测左线隧道3、5号点的平均上浮量分别为28.5 mm和21.6 mm,差值6.9 mm;右线隧道3、5号点的平均上浮量分别为27.5 mm和22.2 mm,差值5.3 mm,表明基坑开挖引起下卧隧道的变形以整体上浮为主,断面形变为辅,右线隧道更

加靠近基坑中轴线,整体上浮趋势更加显著。相比于一次性全部开挖,采用分段开挖左、右线上浮量平均减小了8.9%和4.7%;对于同样采用一次性全部开挖的工况,进行隧道上方抽条加固时,左、右线3、5号测点的上浮量平均减小了6.8%和8.3%。综合采用分段开挖和抽条加固,隧道左、右线最大上浮量平均减小了14.4%。

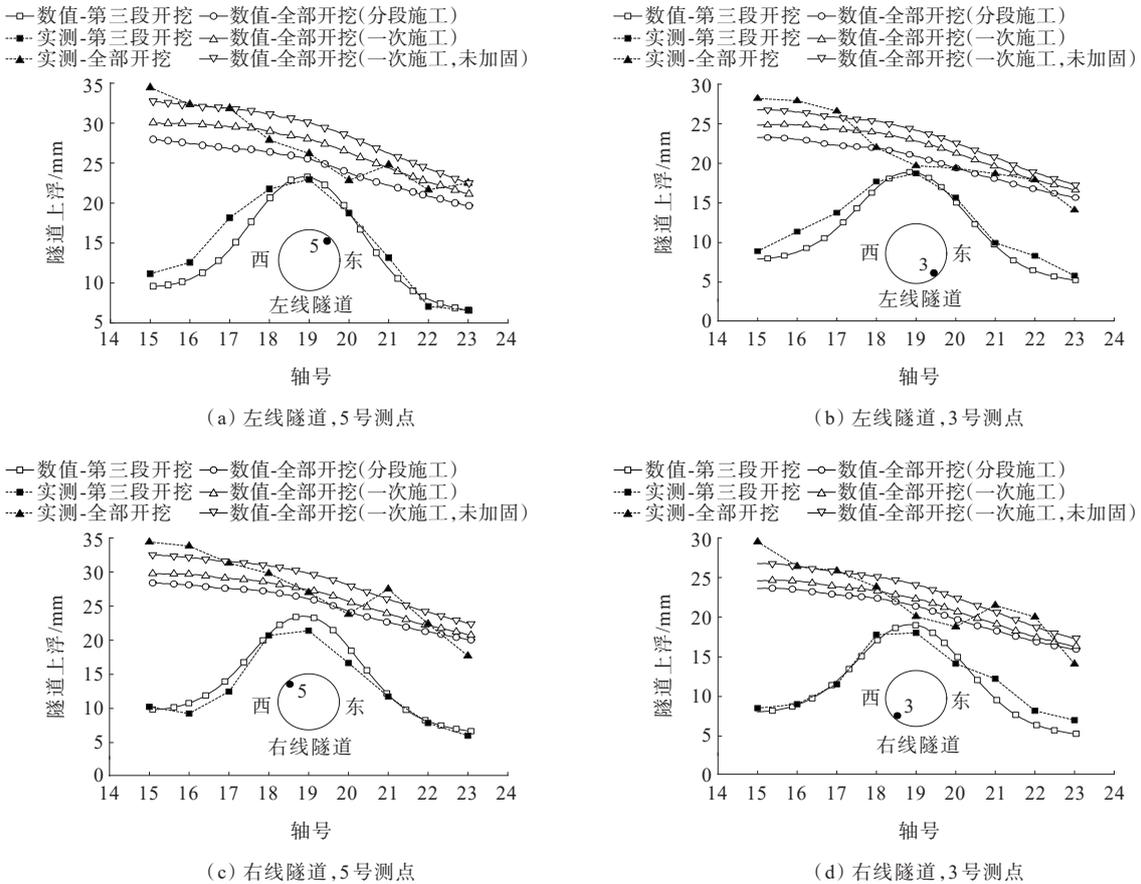


图6 盾构隧道衬砌结构上浮量

Figure 6 Heave of lining structure of shield tunnel

图7为全部开挖后19轴南侧地下连续墙侧移曲线,图中标注了各条曲线的最大位移量和对应深度。相比仿真位移曲线,实测最大位移量23.8 mm接近一次性开挖计算值23.3 mm,大于分段开挖计算值17.0 mm,原因是分段开挖仿真严格按照施工方案,每开挖一段后立即施作底板,而现场底板支模、浇筑至形成强度需要一定时间,此时相邻段已经开始开挖,会引起当前段围护结构侧移进一步发展;相比一次性全部开挖,实测和分段开挖工况的最大位移值对应深度较小,且最大位移以下位置位移下降速率更快,原因是一次性开挖工况是在开挖全部完成且

变形稳定后才激活底板,底板未能完全发挥对围护结构的支撑作用。相比一次开挖,分段开挖时有限元计算得到的地连墙最大侧移减小了27.0%;在一次开挖条件下,土体加固后地连墙最大侧移减小了22.1%。跳挖和隧道上方土体加固可以有效限制基坑围护结构的侧移,围护结构最大侧移减小了49.1%。

### 3.2 衬砌结构收敛

图8为第三段开挖后盾构隧道水平收敛曲线。测量机器人测得的水平收敛值根据1、4号测点水平、竖向位移计算获得。左、右线隧道的水平收敛曲线基本和整体上浮曲线形状相似,15轴~23轴实测

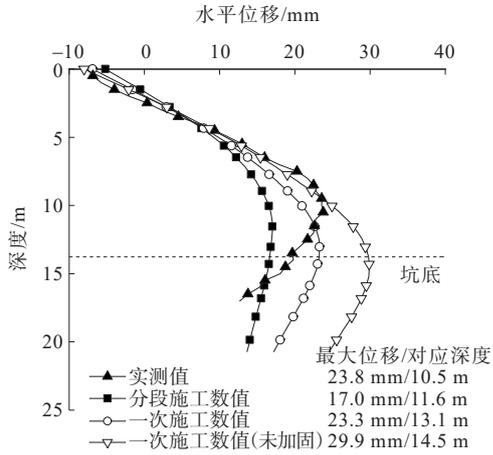
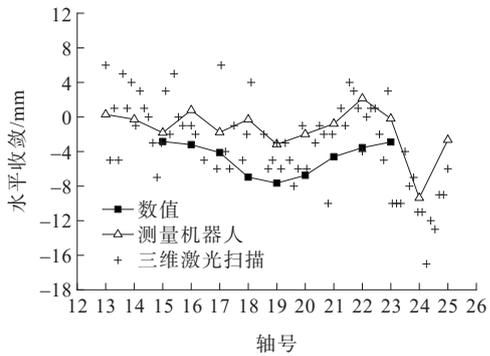
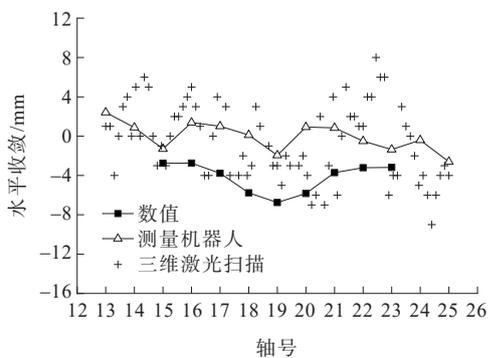


图7 基坑19轴南侧地下连续墙侧移(全部开挖)

Figure 7 Lateral displacement of south underground diaphragm wall at axis 19 of foundation pit (excavation completed)



(a) 左线隧道



(b) 右线隧道

图8 盾构隧道衬砌结构水平收敛(第三段开挖)

Figure 8 Horizontal convergence of lining structure of shield tunnel structure (excavation stage 3 completed)

收敛值小于10 mm,其中18轴~20轴开挖至基坑底,衬砌水平直径减小,横断面受力状况有所改善。两种实测方式测得的水平收敛变化趋势相似,而三维激光扫描获取了每环管片的收敛值,监测密度更高,隧道水平收敛数据波动性较大,这可能与管片错缝拼装引起的刚度差异、地层不均匀分布等因素有关。

有限元建模时隧道简化为均质圆环,和实际情况有所差异,但计算结果和测量机器人、三维激光扫描实测数据趋势基本吻合,大小约为实测值的下限,高估了盾构隧道水平直径减小幅度。

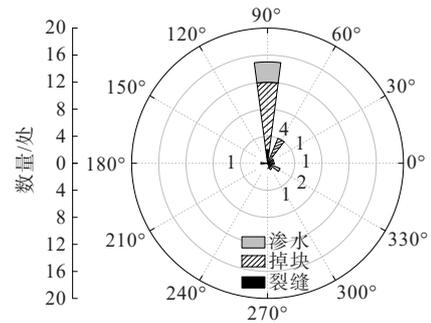
### 3.3 衬砌结构病害机理

根据高清摄影结果,开挖引起的15轴~23轴隧道病害类型和数量汇总于表6,位置分布见图9。环缝掉块(图10)为主要的病害类型,占总病害数量的52%;病害主要集中在管片拱顶60°~120°,数量占总病害数量的77%,右线隧道的结构病害更加严重。这与Liu等<sup>[23-24]</sup>、刘建文等<sup>[25]</sup>通过数值分析得到的病害位置一致。

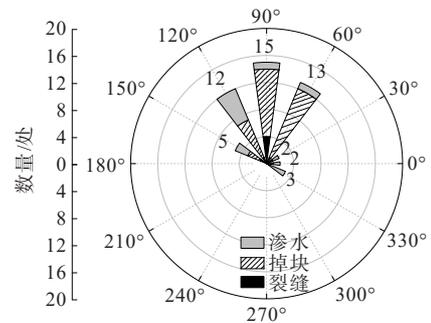
表6 盾构隧道15轴~23轴病害统计

Table 6 Damage statistics of shield tunnel from axis 15 to axis 23

病害类型	左线	右线	合计
纵缝裂缝	1	0	1
环缝裂缝	1	6	7
纵缝掉块	2	5	7
环缝掉块	14	26	40
渗水	7	15	22



(a) 左线隧道



(b) 右线隧道

图9 盾构隧道15轴~23轴病害分布

Figure 9 Damage distribution of shield tunnel from axis 15 to axis 23

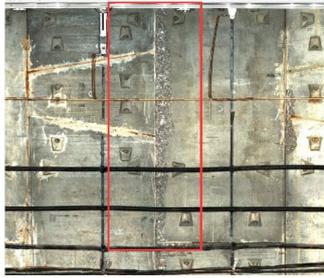


图 10 典型环缝掉块

Figure 10 Spalling at typical circumferential joints

盾构隧道纵向病害主要和隧道不均匀上浮相关。Liu等<sup>[26]</sup>开展的错缝足尺接头试验结果表明:在负弯矩作用下,接头内侧混凝土首先产生压剪裂缝并逐步发展;Ding等<sup>[27]</sup>的足尺接头试验表明:相比纯弯矩作用,在轴力-弯矩-剪力共同作用下接头更容易发生混凝土压损。以第三段开挖后的隧道受力情况为例,分析拱顶环缝的病害机理,图 11 为盾构隧道拱顶的纵向弯矩和剪力曲线。

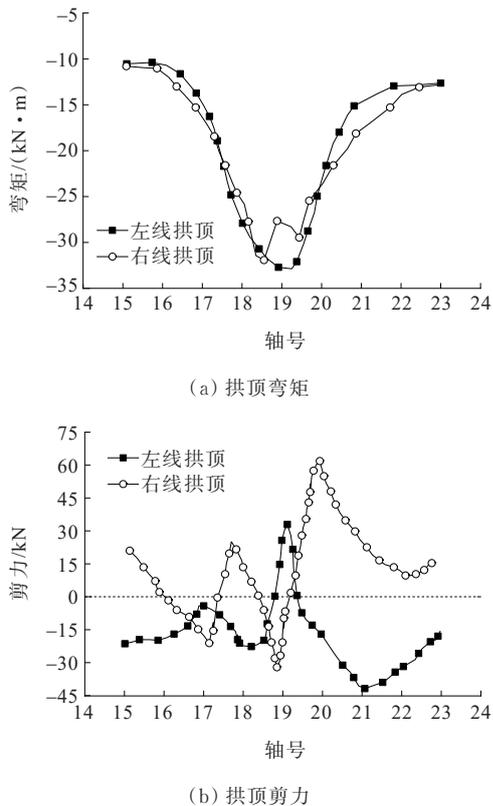


图 11 第三段开挖后隧道拱顶受力

Figure 11 Tunnel crown force at excavation stage 3

由图 11 可知:左线隧道拱顶最大弯矩为 -32.87 kN·m(外侧受拉),出现在 19 轴附近;右线隧道拱顶最大弯矩为 -31.92 kN·m,出现在 18 轴~19

轴。左线隧道拱顶剪力最大、最小值分别为 32.37 kN(19 轴)、-41.46 kN(21 轴);右线隧道拱顶剪力最大、最小值分别为 61.57 kN(20 轴)、-32.28 kN(19 轴)。在弯矩-剪切力共同作用下,拱顶环缝内侧混凝土产生应力集中和压剪切裂缝,随后逐渐发展为掉块。右线隧道拱顶处剪力更大,因此结构病害更加严重。

### 4 结论

基于深圳花岗岩残积土层深基坑长距离上跨新建地铁隧道施工的工程案例,建立三维有限元模型,对基坑施工全过程隧道上浮、水平收敛、衬砌结构受力和病害分布特征进行研究和分析,得出以下结论:

(1) 基坑卸载引起隧道变形以整体上浮为主,断面变形为辅,越接近基坑中轴线隧道整体上浮趋势越显著;随着隧道穿越和下卧土层刚度增大,上方卸载引起的隧道上浮量逐渐减小。由于现场底板浇筑至形成强度需要一定时间,在施工进度较快的情况下分段开挖的效果并未充分发挥。

(2) 数值仿真结果表明,相比于竖向分层、单层一次性全部开挖的方式,采用跳仓开挖并对隧道拱顶上方土体进行抽条式加固后,隧道左、右线最大上浮量平均减小了 14.4%,围护结构最大侧移减小了 49.1%,分段开挖和土体旋喷加固对基坑围护结构变形的控制效果更优。

(3) 上方基坑卸载引起既有隧道的病害主要为环缝掉块,并且拱顶区域的结构病害占比 70% 以上。在弯矩-剪力共同作用下,拱顶环缝内侧混凝土受应力集中影响产生压剪裂缝,进而发展为掉块。因此,在控制上方基坑开挖引起的隧道不均匀上浮的同时,应加强隧道拱顶环缝的监测和预警。

### 参考文献:

#### References:

[1] 朱旻,陈湘生,王雪涛. 盾构隧道衬砌结构性能演化分析与思考[J]. 工程力学, 2022, 39(3): 33-50.  
ZHU Min, CHEN Xiangsheng, WANG Xuetao. Analysis and thinking on structural performance evolution of shield tunnel lining[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(3): 33-50.

[2] 郭军,闻家明,顾问天,等. 上跨盾构隧道的地下空间开发技术[J]. 铁道建筑, 2020, 60(7): 64-68.  
GUO Jun, WEN Jiaming, GU Wentian, et al. Development

- technology of underground space over shield tunnel[J]. Railway Engineering,2020,60(7):64-68.
- [3] 刘宽,徐志豪,汤渊,等.基坑爆破开挖爆点位置与基坑高度对爆破振动影响研究[J].中外公路,2024,44(2):214-219.  
LIU Kuan, XU Zhihao, TANG Yuan, et al. Influence of blasting point position and foundation pit height on blasting vibration during foundation pit blasting excavation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2):214-219.
- [4] 赵朋. 基坑开挖对零距离下卧盾构隧道的影响[J]. 中外公路, 2023, 43(6):253-260.  
ZHAO Peng. Influence of foundation pit excavation on zero distance underground shield tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6):253-260.
- [5] 卜康正,郑先昌,张万照,等. 基坑开挖引起复合地基下卧双线地铁隧道附加荷载的计算研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(8):126-133.  
BU Kangzheng, ZHENG Xianchang, ZHANG Wanzhao, et al. Calculation study of additional load of double-tube metro tunnels under composite foundation due to foundation pit excavation[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(8):126-133.
- [6] 姚宏波,李冰河,童磊,等. 考虑空间效应的软土隧道上方卸荷变形分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7):2453-2460.  
YAO Hongbo, LI Binghe, TONG Lei, et al. Analysis of metro tunnel deformation by upper excavation unloading considering spatial effect in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7):2453-2460.
- [7] 张鑫海,魏纲,林心蓓. 考虑纵向变形影响的基坑下方盾构隧道横向受力变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11):2351-2364.  
ZHANG Xinhai, WEI Gang, LIN Xinbei. Research on transverse force and deformation of shield tunnels below foundation pits considering influence of longitudinal deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(11):2351-2364.
- [8] 岳云鹏,郑先昌,刘晓玉,等. 流固耦合作用下基坑开挖及降水对下卧既有地铁隧道的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(4):151-156,167.  
YUE Yunpeng, ZHENG Xianchang, LIU Xiaoyu, et al. Effect of foundation pit excavation and dewatering on existing subway tunnels subject to fluid-solid coupling of soils[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(4):151-156,167.
- [9] 钟翰虎,李聪,李雨林,等. 偏压荷载下深基坑支护结构非对称变形与控制技术研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1):34-37.  
ZHONG Hanhu, LI Cong, LI Yulin, et al. Research on asymmetric deformation and control technology of supporting structure of deep foundation pit under eccentric load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1):34-37.
- [10] 彭智勇,杨秀仁. 基坑分块开挖参数对邻近地铁盾构隧道的变形影响分析[J]. 中外公路, 2019, 39(2):206-210.  
PENG Zhiyong, YANG Xiuren. The deformation influence about block excavation parameters of foundation pit adjacent to metro shield tunnels[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2):206-210.
- [11] 刘天正. 砂卵石地层基坑开挖对下卧运营盾构隧道结构变形研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(9):84-90.  
LIU Tianzheng. Study on the structural deformation of underlying operating shield tunnel caused by foundation pit excavation in sand-gravel stratum[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(9):84-90.
- [12] 张浩,范建军,黄醒春. 开挖方式对下卧隧道变形影响的模型试验研究[J]. 中外公路, 2020, 40(4):202-209.  
ZHANG Hao, FAN Jianjun, HUANG Xingchun. Model test study on effect of excavation method on deformation of a lower lying tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4):202-209.
- [13] ZHAI Q, RAHARDJO H, SATYANAGA A. Variability in unsaturated hydraulic properties of residual soil in Singapore[J]. Engineering Geology, 2016, 209:21-29.
- [14] 陈控,吴怀娜,陈仁朋,等. 上方长距离基坑开挖引起的共线隧道变形研究[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(6):698-706.  
CHEN Shuan, WU Huaina, CHEN Renpeng, et al. Deformation of a collinear tunnel induced by overlying long-distance excavation[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2021, 55(6):698-706.
- [15] ZHU M, GONG X N, GAO X, et al. Remediation of damaged shield tunnel using grouting technique: Serviceability improvements and prevention of potential risks[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019, 33(6):04019062.
- [16] MENG F Y, CHEN R P, WU H N, et al. Observed behaviors of a long and deep excavation and collinear underlying tunnels in Shenzhen granite residual soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 103:103504.
- [17] MENG F Y, CHEN R P, XIE S W, et al. Excavation-induced

- arching effect below base level and responses of long-collinear underlying existing tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*,2022,123:104417.
- [18] 安然,孔令伟,张先伟. 残积土孔内剪切试验的强度特性及广义邓肯-张模型研究[J]. *岩土工程学报*,2020,42(9): 1723-1732.  
AN Ran, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei. Mechanical properties and generalized Duncan-Chang model for granite residual soils using borehole shear tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9): 1723-1732.
- [19] 周小文,罗兴财. 全风化花岗岩与花岗岩残积土的判别及物理力学性质对比[J]. *长江科学院院报*,2022,39(4): 1-7.  
ZHOU Xiaowen, LUO Xingcai. Identification and physical mechanical property comparison between completely decomposed granite and granite residual soil[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2022, 39(4): 1-7.
- [20] SCHNAID F, AR ORTIGAO J, MÁNTARAS F M, et al. Analysis of self-boring pressuremeter (SBPM) and marchetti dilatometer (DMT) tests in granite saprolites[J]. *Canadian Geotechnical Journal*,2000,37(4):796-810.
- [21] 朱旻,陈湘生,张国涛,等. 花岗岩残积土硬化土模型参数反演及工程应用[J]. *岩土力学*,2022,43(4):1061-1072.  
ZHU Min, CHEN Xiangsheng, ZHANG Guotao, et al. Parameter back-analysis of hardening soil model for granite residual soil and its engineering applications[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2022,43(4):1061-1072.
- [22] 施成华,李翔,雷明锋,等. 基坑上跨既有盾构隧道坑底土体加固方式探究[J]. *铁道科学与工程学报*,2020,17(5): 1147-1155.  
SHI Chenghua, LI Xiang, LEI Mingfeng, et al. Study on reinforcement method for foundation pit of existing shield tunnel under foundation pit[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*,2020,17(5):1147-1155.
- [23] LIU J W, SHI C H, LEI M F, et al. A study on damage mechanism modelling of shield tunnel under unloading based on damage-plasticity model of concrete[J]. *Engineering Failure Analysis*,2021,123(3):105261.
- [24] LIU J W, SHI C H, WANG Z X, et al. Damage mechanism modelling of shield tunnel with longitudinal differential deformation based on elastoplastic damage model[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2021,113: 103952.
- [25] 刘建文,施成华,雷明锋,等. 基于混凝土损伤模型的卸载作用下盾构隧道损伤机理[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2021,52(3):758-769.  
LIU Jianwen, SHI Chenghua, LEI Mingfeng, et al. Damage mechanism of shield tunnel under unloading based on elastoplastic damage model of concrete[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*,2021, 52(3):758-769.
- [26] LIU X, DONG Z B, SONG W, et al. Investigation of the structural effect induced by stagger joints in segmental tunnel linings: Direct insight from mechanical behaviors of longitudinal and circumferential joints[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2018,71:271-291.
- [27] DING W Q, GONG Y F, QIAO Y F, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of segmental joint under combined loading of compression-bending-shear[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2020,98: 103346.