

# 基坑开挖对零距离下卧盾构隧道的影 响

赵朋

(中铁一局集团厦门建设工程有限公司,福建 厦门 361000)

**摘要:**为了解基坑开挖对零距离下卧盾构隧道的影响,以中国首例基坑零距离上跨地铁隧道工程——厦门地铁某停车场与主线重叠段为依托,通过PLAXIS 3D岩土有限元软件建立区间隧道基坑分区开挖模型,采用分层、分块、分条、对称等方式制定土层开挖方案,考察3种不同开挖方案下,下卧盾构隧道的响应情况。研究结果表明:由于总开挖卸载量一致,不同的基坑分层、分区开挖工序对地层及下卧隧道影响较小,响应规律大体一致;3种开挖方案下,基坑壁后地表沉降极值、下卧隧道竖向位移及弯矩极值的差异分别为1%、10%和3%左右;及时施作基坑底板可以提供反压作用,一定程度上抑制地层位移和隧道变形及内力极值。现场实践表明:实际施工方案可靠,盾构隧道结构安全稳定。

**关键词:**盾构隧道;基坑开挖;零距离上跨;时空效应

**中图分类号:**U455

**文献标志码:**A

## 0 引言

现阶段各大城市地铁线路已较为发达,地下线路交错,在新建地铁或其他建(构)筑物过程中,穿越既有结构已不可避免<sup>[1-2]</sup>。当新建基坑近距离甚至“零距离”上跨既有线段或车站时,必然对既有结构产生扰动,增大既有结构的受力变形<sup>[3-5]</sup>。若出现突发或偶然因素,很可能导致既有结构超过其承受能力或允许值,发生结构破坏。国内外基坑上跨既有隧道的工程案例中,一般采用近距离施工,基坑底与下卧隧道尚有一定的距离,在加固措施中,一般采用土层加固、利用抗滑桩抑制下卧隧道隆起等措施。而本次研究是基于基坑零距离上跨盾构隧道,即基坑的开挖将盾构上方的土体全部卸载,所以引起下卧盾构隧道的变形机理及控制措施也将不同。由于基坑的开挖施工及其对下卧隧道的影响具有明显的过程性和时间性,对基坑的回弹量有很大的影响。小的开挖段,其基坑的坑底回弹较小,影响范围也小;而长开挖中回弹量大影响范围也较大。这主要是因为小开挖段中土体的空间作用强于长开挖段中土体的空间作用。基坑一次开挖卸载量值过大,分

区域开挖又影响施工进度,因此,有必要对基坑开挖方案展开研究。由于理论解析法无法考虑复杂多变和各种各样的基坑施工工况、施工手段、场地地质的影响<sup>[6]</sup>,而有限元数值模拟不仅能针对性地模拟出基坑施工的全过程,高度拟合匹配基坑围护结构、隧道结构材料属性和结构形式,还能通过软件计算出下卧隧道的变形大小和内力变化情况,因此数值模拟方法受到越来越多学者的欢迎和应用<sup>[7-8]</sup>。黄海滨等<sup>[9]</sup>结合某箱形隧道基坑上跨既有地铁隧道工程,针对工程的开挖特性,借助有限元法优化设计基坑施工组织;文先锋等<sup>[10]</sup>以某地铁出入口基坑上跨既有电力线管道工程为背景,结合工程特点及理论仿真分析成果,优化基坑开挖方案,成功实现对地下深埋管线的保护;庞振勇<sup>[11]</sup>依据南京某深大基础上跨既有地铁1号线区间工程,通过数值模拟基坑上跨隧道施工过程,探讨上方基坑不同开挖方式对既有地铁隧道变形的影响,保证地铁隧道运营安全。尽管目前中国关于基坑施工对下卧隧道研究较多,且一般都是针对基坑底与下卧隧道尚存在一定距离的情况,而对新建基坑零距离上跨既有隧道很少涉及。

基于此,本文依托中国首个明挖隧道零距离上跨既有盾构隧道的案例——厦门地铁湿地公园站—

收稿日期:2022-10-20(修改稿)

基金项目:厦门市建设局科技项目(编号:XJK-2020-1-21);福建省住房和城乡建设科技计划项目(编号:2017-K-88)

作者简介:赵朋,男,大学本科,高级工程师.E-mail:181397676@qq.com

高林停车场出入线区间工程,根据明挖基坑上跨正线盾构隧道段典型剖面,建立基坑一下卧隧道三维概化数值模型,考虑分层、分块、分条、对称等开挖方案,研究基坑分段、分层开挖支护卸载回弹时空效应对下卧隧道的影,为确保新建工程及既有结构的安全稳定提供参考,并总结出一些对类似基坑设计及施工具有参考价值的结论。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

厦门地铁湿地公园站—高林停车场出入线明挖区间,总长 166.052 m,基坑底宽约 15.2 m,设计深度约 14.5 m。该出入线区间隧道采用明挖法施工,基坑部分上跨既有高林站—湿地公园站正线区间盾构隧道,基坑底与既有盾构隧道紧贴,即零距离接触。平面位置关系如图 1 所示。

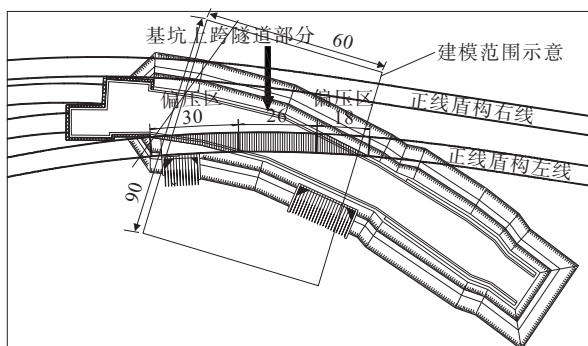


图 1 明挖区间基坑上跨隧道位置关系图(单位:m)

下卧盾构隧道采用平板形单层钢筋混凝土管片衬砌,管片采用 C50 混凝土,抗渗等级 P10;盾构隧道

衬砌外径 6 200 mm,内径 5 500 mm;衬砌环宽度 1 200 mm,厚度 350 mm。

### 1.2 工程地质与水文地质概况

根据勘探孔揭露的地层情况,场区主要地层岩性包括<1-1>杂填土、<5-1-2>粉质黏土、<11-1-2>残积砂质黏性土、<11-1-3>残积砂质黏性土、<17-1>全风化花岗岩、<17-2>散体状强风化花岗岩,如图 2 所示。杂填土主要由黏性土、砖块、混凝土块等建筑垃圾组成;粉质黏土以黏、粉粒为主,韧性中等,干强度中等;残积砂质黏性土以粉粒为主,韧性低,干强度高;全风化花岗岩岩芯呈砂土状,岩体极破碎,遇水易软化;散体状强风化花岗岩,岩芯呈土柱状,手捏易散,遇水易软化,为极软岩。

该区段内地下水主要有赋存于粉质黏土、残积土、全强风化岩中的第四系孔隙水及赋存于基岩裂隙中的裂隙水。地下水以潜水为主,局部受上覆相对隔水层作用具承压或微承压性质。地下水位埋深 0.5~5.3 m,均位于设计底板以上。

### 1.3 基坑支护设计

明挖段深基坑围护结构根据地形条件、周边环境 and 地下管线情况采用不同支护类型。选取明挖基坑上跨正线盾构区间段的典型剖面如图 2 所示,采用 1:0.75 放坡开挖,两级坡、土钉墙支护,上下级边坡设 2.6 m 宽平台,土钉采用  $\phi 22$  钢筋、间距  $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ,梅花形布置、竖向倾角  $15^\circ$ 。

## 2 数值模拟

为了深入分析高林停车场出入线区间上跨盾构

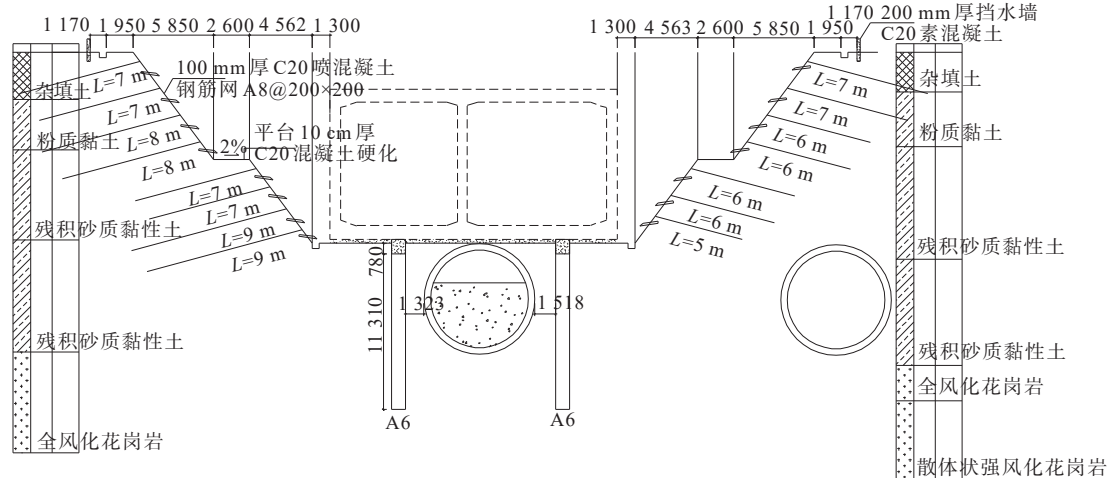


图 2 高林停车场出入线区间与零距离下卧盾构隧道典型剖面(单位:mm)

隧道部分放坡开挖施工对下卧隧道的影响,选取上跨段建立地层、基坑及下卧盾构隧道三维数值模型,模拟分层、分区开挖过程,研究基坑不同开挖工序对下卧隧道变形的影响。

2.1 数值模型设计

采用PLAXIS 3D岩土有限元程序建立数值模型,建模范围见图1。模型沿基坑纵向长60 m(y轴),横向宽度取90 m(x轴),沿深度方向(z轴)取至<17-2>散体状强风化花岗岩,总深31 m,如图3所示,地质模型中共涉及6类岩土层。

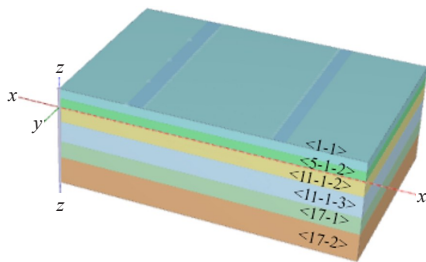


图3 三维工程地质模型

为了便于进行开挖卸载规律研究,将基坑概化为直线形基坑,降水概化为随挖随降。根据基坑放坡开挖设计剖面及其与下卧隧道空间位置关系(图2),建立结构模型,如图4所示。其中土钉墙喷混层为C20混凝土,厚0.1 m,采用板单元模拟;土钉采用φ22钢筋,采用嵌入式梁单元模拟;隧道管片采用实体单元模拟,管片厚度0.35 m。

三维实体模型网格划分采用10节点高阶四面体

单元,在结构附近加密网格,共划分131 315个实体单元,212 282个节点,如图5所示。

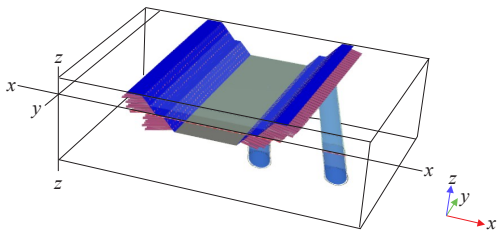


图4 基坑上跨隧道结构模型

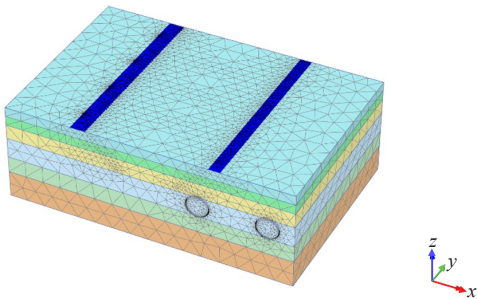


图5 基坑上跨隧道三维网格模型

模型中岩土体均假定为弹塑性材料,采用本构HS small(HSS)模型模拟,结合地区类似工程反分析的参数结果(文献[12])确定计算参数,如表1所示。

隧道管片视为线弹性材料,重度25 kN/m<sup>3</sup>,弹性模量30 GPa,泊松比0.15。土钉墙喷混层板单元,弹性模量25.5 GPa,泊松比0.15。模拟土钉的嵌入式梁单元弹性模量25.5 GPa,土钉与土体间的摩阻力通过土-结构接触面强度折减的方式自动计算,折减系数根据程序手册中的建议值结合经验,取0.8。

表1 岩土体物理力学参数

岩土层编号	$\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$E_{50}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$m$	$c'_{\text{ref}}/\text{kPa}$	$\varphi'/(^{\circ})$	$\gamma_{0.7}$	$G_0^{\text{ref}}/\text{kPa}$	$v_{\text{ur}}$	$R_{\text{inter}}$	$k/$ ( $\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ )
<1-1>	16.0	5 000	5 000	25 000	0.60	10	23	0.000 3	50 000	0.2	0.8	2.00
<5-1-2>	18.4	6 200	6 200	24 800	0.60	26	23	0.000 3	60 000	0.2	0.8	0.03
<11-1-2>	18.0	5 500	5 500	27 500	0.65	29	27	0.000 2	55 000	0.2	0.8	0.10
<11-1-3>	18.3	5 900	5 900	29 500	0.6	30	28	0.000 2	59 000	0.2	0.8	0.1
<17-1>	18.9	15 000	15 000	45 000	0.5	31	30	0.000 1	90 000	0.2	1.0	0.5
<17-2>	18.5	25 000	25 000	75 000	0.5	32	32	0.000 1	150 000	0.2	1.0	1.0

注:γ为重度; $E_{50}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水剪切试验的参考割线模量; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为固结试验的参考切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为三轴固结排水卸载-再加载试验的参考卸载再加载模量; $m$ 为与模量应力水平相关的幂指数; $c'_{\text{ref}}$ 为有效黏聚力; $\varphi'$ 为有效内摩擦角; $\gamma_{0.7}$ 为割线剪切模量衰减为初始剪切模量 $G_0$ 的0.7时对应的剪应变; $G_0^{\text{ref}}$ 为小应变刚度试验的参考初始剪切模量; $v_{\text{ur}}$ 为卸载再加载过程泊松比; $R_{\text{inter}}$ 为界面折减系数; $k$ 为渗透系数。

2.2 方案模拟

分析不同开挖工序对下卧隧道变形的影响,为便于比较,共考虑3种开挖方案,具体如下:

(1) 方案1:根据开挖顺序、开挖分区模拟施工过

程,先在基坑与隧道相交处一侧分层放坡开挖,分层厚度3 m,坡比约1:1.67(3:5),开挖至坑底后,先后分步放坡开挖,每次开挖长度5 m,开挖到模型左边界( $Y_{\text{min}}$ )后,再向前分步放坡开挖至模型右边界



( $Y_{\max}$ ),坡比均为 1:1.67(3:5)。为节省篇幅,仅提供部分步序的模型图,如图 6 所示。

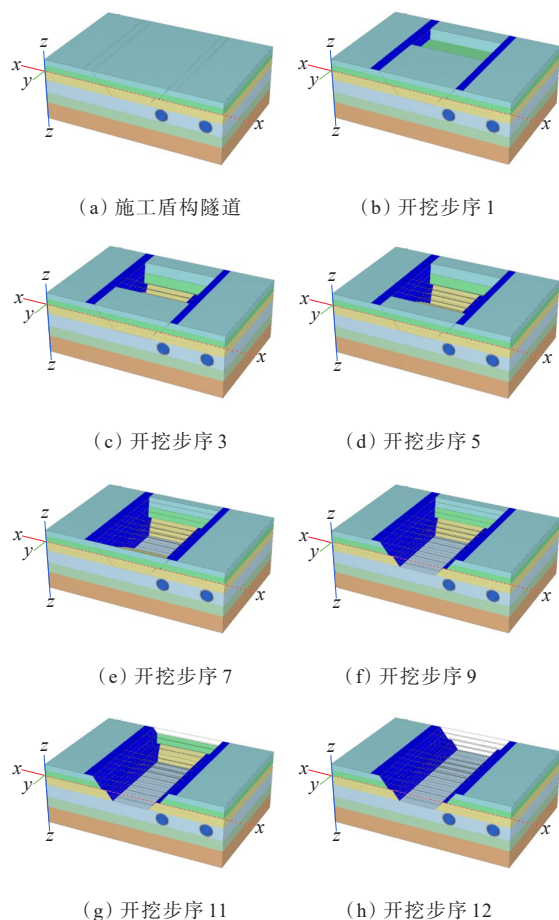


图 6 方案 1 基坑开挖部分工序模拟图

(2) 方案 2:从左到右分层、分区顺序开挖,自模型左边界( $Y_{\min}$ )分层放坡开挖,分层厚度 3 m,放坡坡比为 1:1.67(3:5),开挖至坑底后,沿原坡比逐步向前放坡开挖,每步开挖长度 5 m,直至模型右边界( $Y_{\max}$ ),为节省篇幅,单方向顺序开挖仅提供步序 6 的模型图,如图 7 所示。

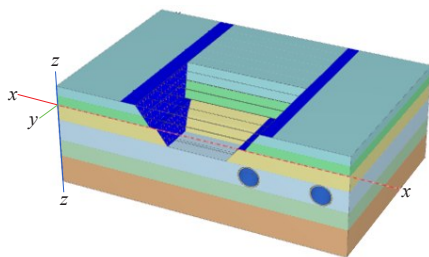


图 7 方案 2 开挖工序模拟图(单方向顺序开挖)(步序 6)

(3) 方案 3:从中间向两端对称、同步开挖,先在基坑与隧道相交处一侧分层放坡开挖,分层厚度 3 m,坡比约 1:1.67(3:5),开挖至坑底后,沿基坑纵向

两侧同时向后、向前逐步放坡开挖至模型左右边界,坡比仍为 1:1.67(3:5),每步开挖长度 5 m,为节约篇幅,对称开挖仅提供步序 8 的模型图,如图 8 所示。

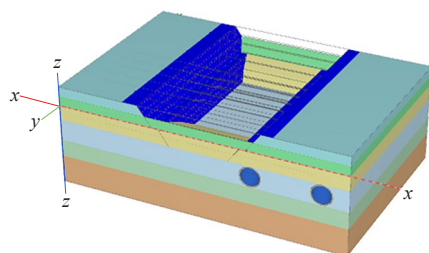


图 8 方案 3 基坑开挖工序模拟图(对称开挖)(步序 8)

### 3 计算结果分析

#### 3.1 方案 1 开挖工况下结果分析

##### 3.1.1 地层竖向位移

方案 1 开挖工况下各开挖步序对应的地层竖向位移如图 9 所示。

从图 9 可以看出:地层竖向位移分布随开挖部位及相应开挖深度而变化,位移极值分布位置基本与基坑开挖到底的区段中心位置相对应,体现了基坑开挖的空间效应。基坑侧壁后方地表最大沉降为 -63.1 mm。

##### 3.1.2 隧道竖向位移

方案 1 开挖工况下各开挖步序对应的隧道竖向位移如图 10 所示。

由图 10 可知:隧道变形随开挖过程的变化,也在一定程度上反映了基坑开挖的空间效应,尤其是处于坑底区域下方的左线隧道,比基本处于坑底区域以外的右线隧道所受影响更明显。最终坑底下方左线隧道随坑底隆起,最大竖向位移达到 64.38 mm,而右线隧道则表现出少量的沉降变形,最大沉降量 -4.04 mm。

##### 3.1.3 隧道内力分布

方案 1 开挖工况下各开挖步序对应的隧道内力分布云图如图 11、12 所示。在隧道内力方面,建模时采用实体单元模拟盾构管片,为了方便提取管片结构内力,在管片实体单元内插入了一层刚度远低于实际管片的板单元用于提取内力结果,板单元的刚度设为管片实际刚度的 0.001,这样在输出管片内力结果时,需要将其结果放大 1 000 倍,得到管片实际内力结果,即图 11、12 中的管片内力数值需要放大 1 000 倍。

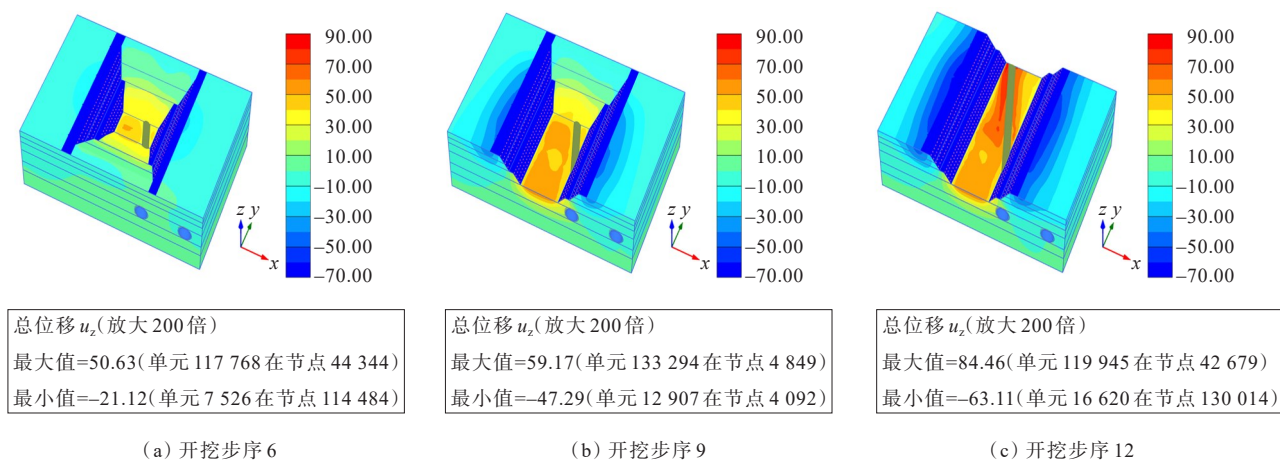


图9 开挖过程地层竖向位移云图(单位:mm)

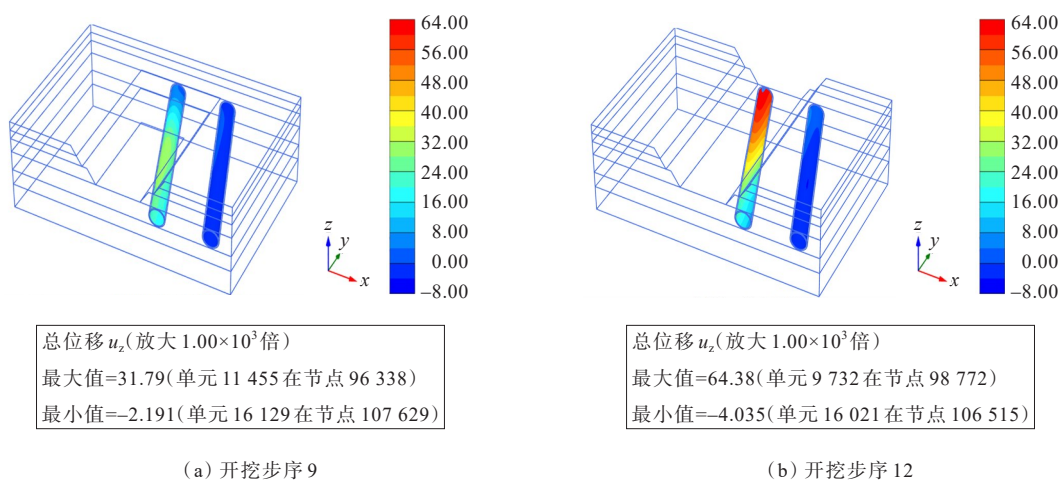


图10 开挖过程隧道竖向位移云图(单位:mm)

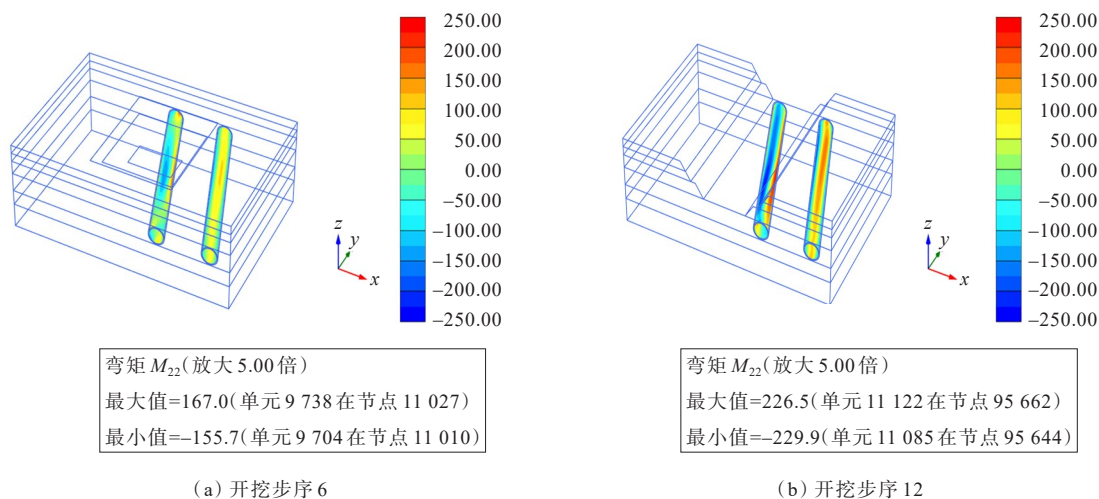


图11 开挖过程隧道弯矩云图[单位:(N·m)/m]

由图11、12可知:① 同样是位于坑底下方区域的左线隧道内力要高于右线隧道,左线最大弯矩-229.9 kN·m,右线最大弯矩-188.5 kN·m,且内力极值并不是出现在隧道拱顶正中,而是偏向邻近

基坑一侧。隧道结构内力分布沿隧道轴向有一定变化,以左线隧道为例,在隧道与坑底侧壁交接处附近隧道内力值要高于其他区域,表明此处隧道受基坑开挖影响最为严重;② 隧道内力分布随开挖过程的

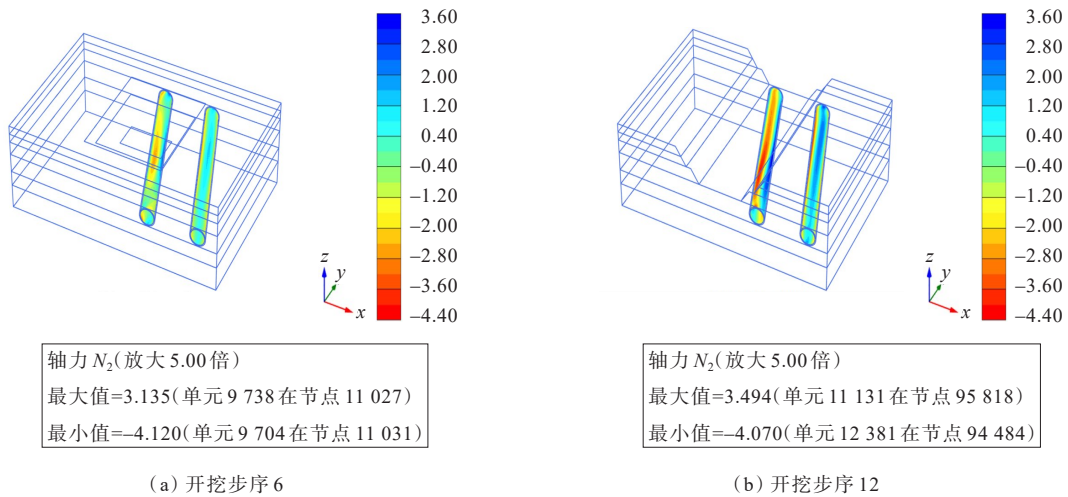


图 12 开挖过程隧道轴力云图(单位:kN/m)

变化,在一定程度上反映了基坑开挖的空间效应。

3.2 3种开挖方案对比

不同开挖方案下最终的地层竖向位移和隧道变形及内力极值如表2所示。

表 2 不同开挖方案下地层与隧道计算结果最大值

项目	地表竖向位移/mm	隧道水平位移/mm	隧道竖向位移/mm	隧道轴力/(kN·m <sup>-1</sup> )	隧道弯矩/[(kN·m)·m <sup>-1</sup> ]
方案 1	-63.11	-25.56	64.38	-4 070 3 494	-229.9 226.5
方案 2	-62.78	-24.73	64.85	-4 141 3 583	-235.4 230.2
方案 3	-63.52	-24.52	69.56	-4 047 3 517	-229.2 227.8
[(X <sub>2</sub> -X <sub>1</sub> )/X <sub>1</sub> ]/%	-0.52	-3.25	0.73	1.74 2.55	2.39 1.63
[(X <sub>3</sub> -X <sub>1</sub> )/X <sub>1</sub> ]/%	0.65	-4.07	8.05	-0.57 0.66	-0.30 0.57

注:① 竖向位移,“正”表示隆起,“负”表示沉降;水平位移,“负”表示向坑内方向移动;轴力,“正”表示受拉,“负”表示受压;② X<sub>1</sub>对应方案1的计算结果,X<sub>2</sub>对应方案2的结果,X<sub>3</sub>对应方案3的结果。

由表2可知:3种开挖方案下最终的地表沉降和隧道水平、竖向位移极值基本是一致的,其中方案3与方案1相比隧道最大竖向位移高出8.05%,总的来说,方案2和方案3的结果与方案1相比,地层变形和隧道变形及内力差异大部分都在3%以内,表明基坑和隧道的最终变形受开挖顺序的影响不大。

此外,通过对比各开挖方案下最终的地层竖向位移和隧道竖向变形及弯矩分布云图,可以发现,除

了极值之外,不同开挖方案下地层位移和隧道变形及内力的最终分布情况也基本一致。限于篇幅,仅列出不同开挖方案下隧道竖向位移云图,如图13所示。

综上分析可知:纵使开挖顺序有所不同,但基坑最终的开挖卸载总量是一样的,且支护形式都相同,因此,最终的结果大体一致,隧道所受的影响也差异不大,基坑开挖到底后,方案3对应的左线隧道最大上浮量最大,可达69.56 mm,方案1和方案2的左线隧道上浮量也在65 mm左右。

3.3 考虑及时施作底板结果分析

需要说明的是,3种开挖方案模拟中,并未考虑基坑底板施作,亦即假定基坑底板并未及时施作。若有效控制隧道上浮变形,则需要考虑反压、加载等措施,在方案1开挖方案的基础上,考虑及时施作底板,即各区段基坑开挖到底后都及时施作相应区段的底板,则最终的地层竖向位移、隧道竖向位移和隧道弯矩分布情况如图14所示。

从图14可以看出:及时施作底板后,与方案1相比,地表最大沉降减小为-45.23 mm,降幅约28.3%;隧道最大竖向位移约45.54 mm,降幅约29.3%;隧道最大弯矩约-175.3 kN·m/m,降幅约23.5%。总体来看,及时施作底板对地层变形、隧道变形及内力有一定的抑制作用。

4 工程实施情况分析

4.1 开挖方法

结合设计图纸、施工场地布置,最终选取方案1



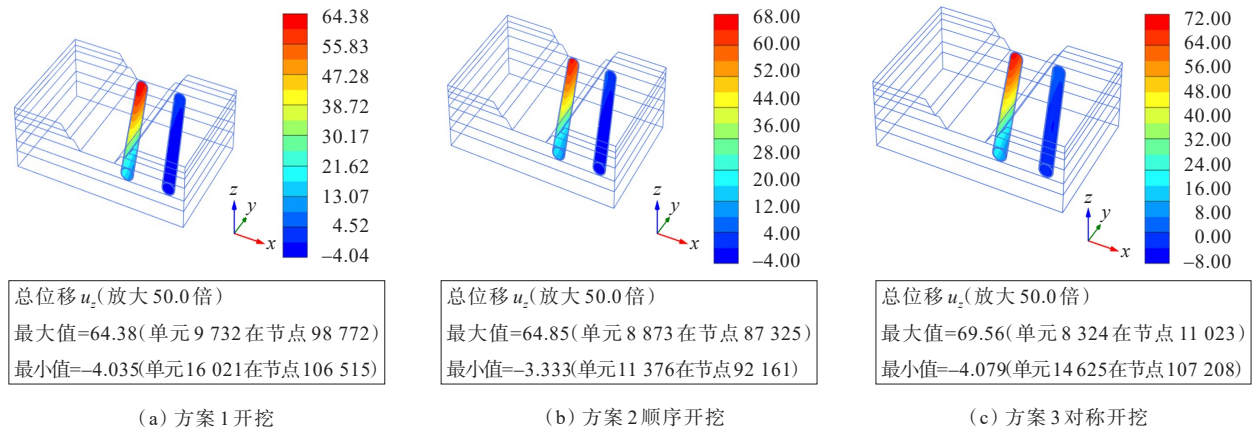


图13 不同开挖方案下隧道竖向位移云图(单位:mm)

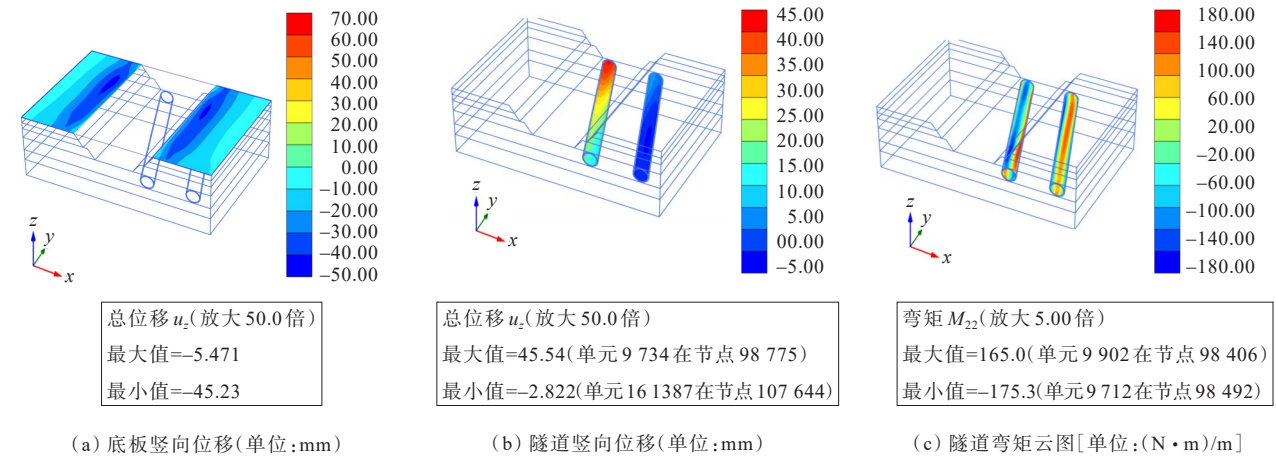


图14 及时施作底板时隧道位移及弯矩分布情况

作为工程现场实际开挖方案,对该部分区域采取分段分小块开挖、快速施作底板的施工方法,并与设计单位对接底板各工序施工时间。将上跨段明挖区间主体结构底板分段,每段长度为5 m,如图15所示。基坑开挖顺序:①→②→③→加载对应下方段及下一段管片→④→对应分段底板施工完成(5 d)→依次开挖下一段。对明挖段盾构上跨正线部分,正线管片3 m以上土方采用PC220挖机进行开挖,管片以上0.5~3 m部分采用PC120挖机进行开挖;基坑底以上0.5 m部分采用人工开挖。

4.2 控制变形的方案

为控制下卧隧道变形,现场还采取隧道管片内堆载反压以及管片纵向加固等综合控制变形措施。

通过对下卧隧道内堆载的空间分布优化分析,对隧道处于基坑开挖区域范围内的区段(即模型中 $y=20\sim60$  m)进行线性分布堆载,并且对左线隧道采用0~72 kPa的线性堆载,对右线则可采用0~36 kPa的线性堆载。

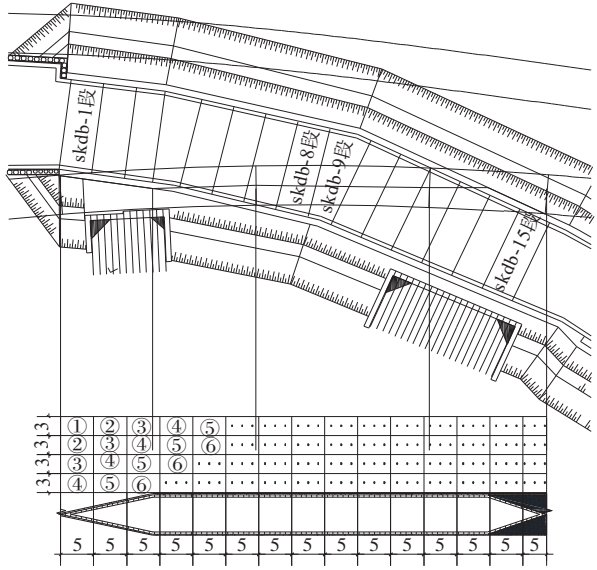


图15 上跨正线盾构区间分段开挖示意图(单位:m)

纵向加固选用14b槽钢,每条隧道分别在基坑上跨段范围内通常设置8根槽钢。

4.3 监测结果

基坑开挖过程中除了进行常规的监测外,还需

对盾构管片结构进行监测,主要包括管片竖向位移以及径向收敛。盾构管片结构内部监测点布置示意如图 16 所示,各监测点沉降时程曲线如图 17 所示。

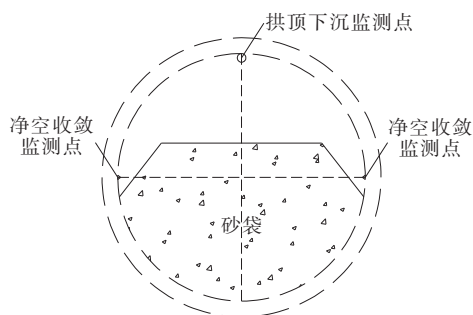


图 16 盾构管片结构内部监测点布置示意图(横剖面)

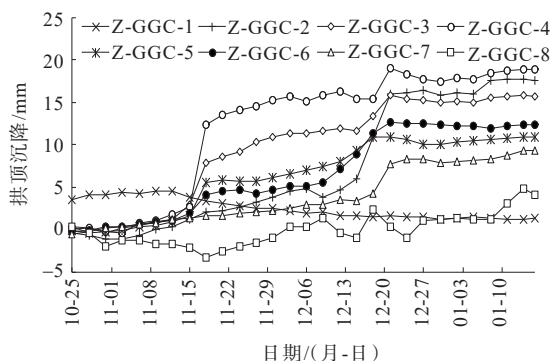


图 17 拱顶沉降时程曲线(2018年)

从图 17 可以看出:管片拱顶沉降累计变化量最大值为 17.7 mm,未超出控制值 20 mm,盾构管片结构安全稳定。

## 5 结论

以厦门 2 号线高林停车场出入线区间基坑上跨正线盾构隧道工程为背景,对零距离上跨段建立概化模型,研究不同开挖方案对下卧盾构隧道的影响,得到以下结论:

(1) 基坑分层、分区开挖施工顺序,对地层位移和隧道变形及内力的最终结果影响不大。

(2) 通过对基坑分层、分区开挖过程的模拟,发现不同开挖工序下基坑最终的地层位移和隧道变形及内力极值及分布情况大体一致,基坑壁后地表最大竖向位移均为 62~64 mm,方案 2、方案 3 与方案 1 的差异均不到 1%;隧道竖向位移极值的最大差异为 5 mm

左右,不到隧道竖向位移总量的 10%;隧道弯矩极值的差异很小,不同方案间的最大差异不到 3%。

(3) 总的来说,基坑开挖工序对这些影响不大,但若能在分区开挖过程中及时施作基坑底板,则能够产生一定的反压作用,可以在一定程度上抑制地层位移和隧道变形及内力极值。采用方案 1 施工,及时施作底板后,底板最大沉降降幅 28.3%,隧道竖向位移降幅 29.3%,隧道弯矩降幅 23.5%。

施工实践表明:后期采取的实际施工方案合理可靠,监测数据处于允许范围,周边环境及盾构隧道结构安全稳定。

## 参考文献:

- [1] 张旭,张成平,韩凯航,等.隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J].岩土工程学报,2017,39(4):759-766.
- [2] 许有俊,葛绍英,孙凤.盾构隧道下穿地铁车站结构沉降特性研究[J].施工技术,2018,47(7):113-118,123.
- [3] 汪鹏程,王景,周守强.上跨既有隧道的深基坑降水开挖施工数值模拟分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(4):499-506.
- [4] 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.
- [5] 郭鹏飞,杨龙才,周顺华,等.基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J].岩土力学,2016,37(S2):613-621.
- [6] 张冬梅,宗翔,黄宏伟.盾构隧道掘进引起上方已建隧道的纵向变形研究[J].岩土力学,2014,35(9):2659-2666.
- [7] 吴才德,曾婕,成怡冲,等.深基坑开挖空间效应对周围土体及邻近隧道的影响研究[J].建筑结构,2016,46(2):91-95.
- [8] 陈仁朋,孟凡衍,李忠超,等.邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施[J].浙江大学学报(工学版),2016,50(5):856-863.
- [9] 黄海滨,曹洪,梁卫军,等.基坑上跨已运营地铁隧道的设计及实测分析[J].岩土工程学报,2014,36(S1):148-154.
- [10] 文先锋,张毅,曹章平.地铁车站出入口软土深基坑上跨既有电力管道施工技术[J].城市轨道交通研究,2014,17(9):100-104.
- [11] 庞振勇.国铁站房深大基础上跨对地铁隧道变形的影响研究[J].铁道标准设计,2017,61(2):143-148.
- [12] 施有志,林树枝,车爱兰.基于深基坑监测数据的土体小应变刚度参数优化分析[J].应用力学学报,2017,34(4):654-660,813.