

# 有变形缝工况下地铁左右线盾构并行下穿对既有明挖公路隧道变形及应力的影响<sup>\*</sup>

张亮亮<sup>1</sup> 孙前辉<sup>2</sup> 傅金阳<sup>2</sup> 孙文昊<sup>1</sup> 李亚楠<sup>3</sup> 刘 任<sup>2</sup> 杨 州<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉; 2. 中南大学土木工程学院, 410075, 长沙;

3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 450003, 郑州)

**摘 要** [目的] 为确保有变形缝工况下地铁盾构隧道并行下穿既有明挖公路隧道工程的顺利实施, 须对该工况下既有明挖公路隧道的变形情况及应力特征进行分析。[方法] 建立了济南济泺路下穿黄河隧道工程中市域轨道交通 S2 线左右线盾构隧道并行下穿既有明挖公路隧道的精细化模型, 分析了既有明挖公路隧道车道结构底板的  $z$  向(竖向)沉降、 $x$  向(水平向)位移及车道结构底板的应力变化情况。选取有无变形缝 2 种工况, 对 2 个施工步完成后测线的  $x$  向位移和  $z$  向沉降变化情况进行对比。进一步选取工程中的 2 号变形缝, 分析施工过程中 2 号变形缝两侧的结构沉降差和变形缝的应力状态发展历程。[结果及结论] 与无变形缝工况相比, 有变形缝工况降低了既有明挖公路隧道结构的整体性, 改变了其变形及受力特征; 变形缝始终受到拉应力及剪应力的影响; 有变形缝工况下, 变形缝两侧沉降随地铁盾构掘进呈现出明显的变化, 地铁盾构掘进至该变形缝正下方时, 沉降达到最大值。

**关键词** 地铁盾构隧道; 变形缝; 隧道下穿; 既有明挖公路隧道; 结构变形; 结构应力

**中图分类号** U456.3<sup>+1</sup>

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.09.006

## Influence of Metro Shield Left/Right Line Tunnel Parallel Under-passing on the Deformation and Stress of Existing Open-cut Highway Tunnel under Deformation Joint Working Condition

ZHANG Liangliang<sup>1</sup>, SUN Qianhui<sup>2</sup>, FU Jinyang<sup>2</sup>, SUN Wenhao<sup>1</sup>, LI Yanan<sup>3</sup>, LIU Ren<sup>2</sup>, YANG Zhou<sup>2</sup>

(1. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, 410075, Changsha, China; 3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., 450003, Zhengzhou, China)

**Abstract** [Objective] To ensure the successful implementation of metro shield tunnel parallel under-passing through the existing open-cut highway tunnel project under deformation joint condition, it is necessary to analyze the deformation situation and stress characteristics of the mentioned highway tunnel under this working condition. [Method] A refined model of Jinan Rail Transit Line S2 left/right shield tunnel parallel under-passing of the existing open-cut highway tunnel in Jiluo Road Yellow River Tunnel project is established. The  $z$ -direction (vertical) settlement,  $x$ -direction (horizontal) displacement, and stress change of this highway tunnel structure bottom plate are analyzed. Through establishing two working conditions with and without deformation joint, changes of the  $z$ -direction settlement and  $x$ -direction displacement of the measured line are compared. By selecting No. 2 deformation joint in the project, the settlement difference and stress state development history on both sides of No. 2 deformation joint are further analyzed. [Result & Conclusion] Compared to the working condition without deformation joint, that with deformation joint reduces the structural integrity of existing open-cut highway tunnels and changes its deformation and force characteristics. Deformation joints are always subject to tensile and shear stresses. Under deformation joint working condition, settlement on both sides of the deformation joint shows significant changes with the tunneling of metro shield, and reaches its maximum value when the tunneling is directly beneath the deformation joint.

**Key words** metro shield tunnel; deformation joint; tunnel under-passing; existing open-cut highway tunnel; structural deformation; structural stress

地铁盾构隧道下穿既有结构施工是隧道及地下工程中最常见的近接施工类型之一, 需要考虑施工过程中地铁盾构施工与既有结构的相互作用

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(52078496, 51878669); 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(202117)

及由此引起的地层响应。文献[1]通过模型试验与有限元分析结合的方式,研究了多线叠交地铁盾构隧道近距离穿越问题中垂直上穿、下穿、上下夹穿三类典型问题。文献[2]主要研究了地铁盾构近距离正交下穿施工中既有隧道管片的环向内力变化,通过数学分析提出了既有隧道围岩压力重分布模型,并采用实际案例验证了此模型的有效性。文献[3]基于小应变硬化土模型,评估了基坑开挖对下穿地铁隧道的影响。文献[4]以地铁盾构下穿有轨电车线路为工程背景,基于理论分析和数值模拟的手段,分析了地铁盾构下穿对有轨电车线路道床沉降的影响。文献[5]对双线地铁盾构下穿既有结构的规律及施工保护技术进行了研究,发现保护既有隧道的最优方式是加固地层、减少盾尾空隙。文献[6]对地铁盾构隧道穿越群桩基础工程进行了数值模拟对比,分析了注浆加固、纵梁和交叉支撑加固、钻孔灌注桩加固三类加固方法的施工效果。

相较于既有研究,考虑变形缝的地铁盾构并行下穿既有明挖公路隧道的施工案例非常少见。本文以济南济泺路下穿黄河隧道(以下简称“济泺路穿黄隧道”)工程为案例,分析了济南市域轨道交通S2线(以下简称“S2线”)盾构隧道左右线并行下穿对既有明挖公路隧道变形及应力的影响。

通过建立精细化数值模型,评估了隧道施工的安全性,重点探究了变形缝对既有明挖公路隧道的影响效应,以期为类似工程的设计和施工提供参考。

## 1 案例工程概况

济泺路穿黄隧道工程为超大直径地铁盾构隧道下穿地上悬河工程,采用公路和轨道交通合建的方式。本文的研究区段位于济泺路穿黄隧道北岸,地铁左右线盾构隧道并行下穿既有明挖公路隧道工程,下穿段的纵断面示意图如图1所示。

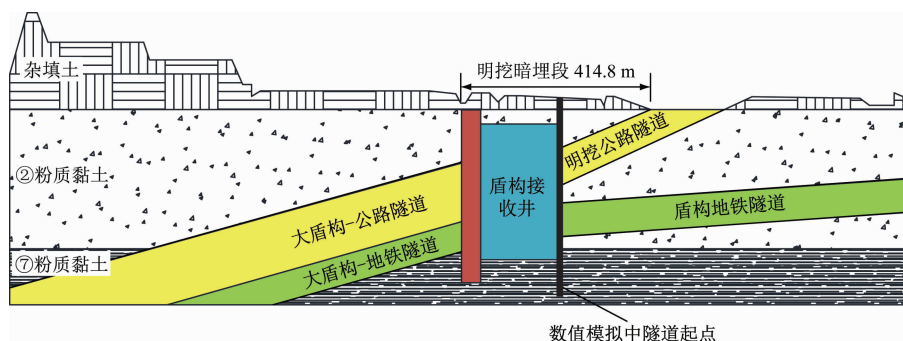


图1 案例工程下穿段纵断面示意图

Fig. 1 Longitudinal section schematic diagram of the case project under-crossing section

该案例中,明挖公路隧道的跨度为30 m,高度为14 m,顶部覆土厚度为5 m,路面标高为26 m,每32 m设置1处宽度为20 mm的变形缝。明挖公路隧道两侧设有地下连续墙,地下连续墙的深度为24 m。地铁左右线盾构隧道先后始发,左右线中心线的间距为16 m。地铁盾构管片外径为6.4 m、厚度为0.3 m。

本文研究区段地层以粉质黏土为主,土层从上往下依次为杂填土、②粉质黏土和⑦粉质黏土。明挖公路隧道与地铁盾构隧道均处于②粉质黏土中,该土层的工程力学性质一般,承载力较低。选取与既有公路隧道中心线最小间距(2.2 m)处的地铁盾构隧道中心线断面作为数值模拟的隧道起点,隧道起点处断面如图2所示。

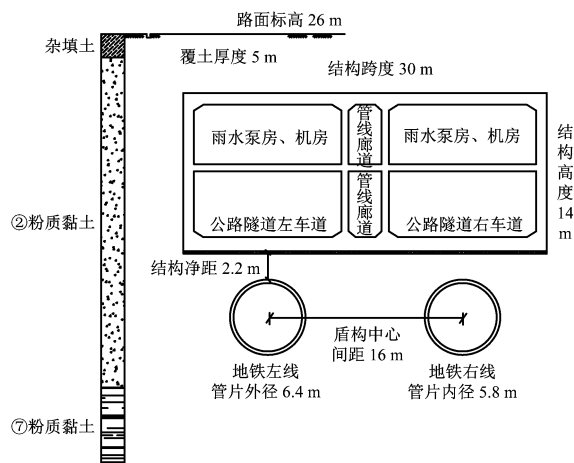


图2 数值模拟隧道起点的断面图

Fig. 2 Section diagram of the tunnel starting point in numerical simulation

2 地铁左右线盾构隧道并行下穿既有明挖公路隧道数值模型

2.1 建立数值模型

图 3 为根据工程实际情况建立的数值模型,模型的尺寸为: $x$  向(水平向)取 80 m, $y$  向(纵向)取 96 m, $z$  向(竖向)取 60 m。模型中除变形缝采用 cohesive element(黏聚力单元)进行模拟外,其余地层及结构均采用实体单元进行模拟。模型各侧面均施加水平向约束,底部施加竖向约束。地铁左右线盾构隧道掘进的施工步如图 4 所示,施工过程中先掘进左线,左线盾构开挖的施工步为第 1 步—第 40 步,右线盾构开挖的施工步为第 41 步—第 80 步。

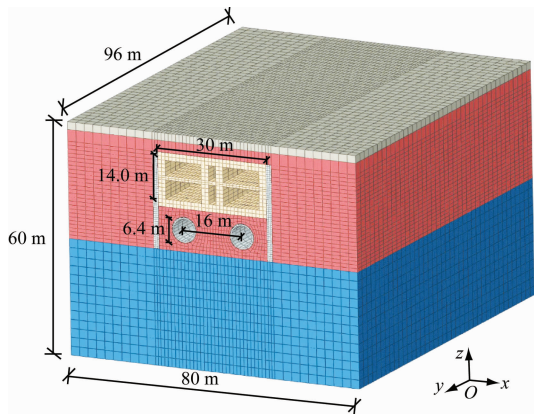
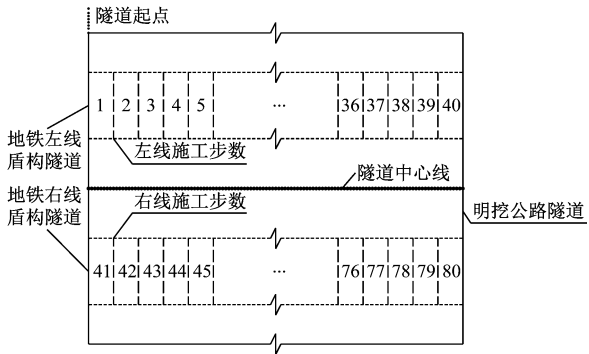


图 3 地铁左右线盾构并行下穿既有明挖公路隧道的三维数值模型

Fig. 3 3D numerical model of metro left/right line shield tunnel parallel under-passing existing open-cut highway tunnel



注:图中数字为地铁左右线盾构开挖的施工步编号。

图 4 地铁左右线盾构隧道掘进的施工步

Fig. 4 Construction steps of shield tunneling for metro left/right line

2.2 设置材料参数

根据工程设计方案,在 ABAQUS 软件中分别建立了土体、明挖公路隧道、地铁盾构隧道,并通过二次开发 HS-S(硬化本构模型)的 UMAT(用户自定义材料力学行为的子程序),对相关参数进行设置。

2.2.1 土体参数

土体根据实际情况简化为三层:第 1 层为杂填土;第 2 层为②粉质黏土;第 3 层为⑦粉质黏土。由于未对杂填土的小应变刚度特性进行试验研究,在数值模拟中该部分土体采用摩尔-库伦本构模型进行计算,土体参数来源于该工程的设计勘察报告。②粉质黏土、⑦粉质黏土均采用 HS-S 本构模型,土体参数通过室内土工试验、勘探资料及工程经验类比得到。各层土体的本构模型参数如表 1 所示。

表 1 土体本构模型参数表

Tab.1 Table of soil constitutive model parameters

土层名称	$C/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$\psi/(\text{^\circ})$	$\rho/(\text{g/cm}^3)$	$\nu_{ur}$	$E/\text{MPa}$	$E_{50,ref}/\text{MPa}$	$E_{oed,ref}/\text{MPa}$	$E_{ur,ref}/\text{MPa}$	$p_{ref}/\text{kPa}$	$R_f$	$K_{0,nc}$	$G_{0,ref}/\text{MPa}$	$\gamma_{0.7}$	$m$
杂填土	18.50	20.10	0.1	1.30	0.2	10									
②粉质黏土	29.03	26.01	0.1	1.98	0.2		9.765	6.18	32.7	100	0.96	0.57	99.3	$2.47 \times 10^{-4}$	0.5
⑦粉质黏土	25.40	20.70	0.1	1.89	0.2		12.630	6.88	40.7	100	0.90	0.50	122.3	$2.00 \times 10^{-4}$	0.5

注: $C$  为有效黏聚力; $\varphi$  为有效内摩擦角; $\psi$  为剪胀角; $\rho$  为土体密度; $\nu_{ur}$  为卸载/重加载泊松比; $E$  为弹性模量; $E_{50,ref}$  为参考割线模量; $E_{oed,ref}$  为参考切线模量; $E_{ur,ref}$  为参考卸载/重加载模量; $p_{ref}$  为刚度参考应力; $R_f$  为破坏比; $K_{0,nc}$  为侧压力系数; $G_{0,ref}$  为参考初始剪切模量; $\gamma_{0.7}$  为剪切模量等于初始值的 70% 时对应的剪切应变值; $m$  为刚度应力水平的相关幂指数。

2.2.2 隧道结构参数

既有明挖公路隧道主体结构采用 C40 防水钢筋混凝土,变形缝的弹性模量为 2.6 MPa,密度为  $1.3 \text{ g/cm}^3$ 。两侧地下连续墙选用 C30 钢筋混凝土。

地铁盾构隧道采用泥水平衡地铁盾构施工,管片选用 C50 混凝土。

同步注浆材料参数根据相关资料进行选择,具体如下:注浆压力较掘进面水土压力高 0.1 ~ 0.2

MPa<sup>[7]</sup>,本文取注浆压力为 0.4 MPa;模拟时采用等代层厚度来代替盾壳与注浆层厚度,基于工程经验,等代层厚度取 0.3 m<sup>[8]</sup>;注浆硬化过程通过改变等代层模量来实现,在盾尾注浆时等代层模量取 4.0 MPa,在浆液硬化时等代层模量取 40.0 MPa;浆液的泊松比取 0.4,密度取 2 000 g/cm<sup>3</sup>。

### 3 地铁左右线盾构并行下穿既有明挖公路隧道的影响分析

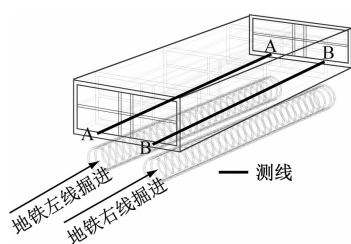
#### 3.1 既有明挖公路隧道结构底板变形分析

研究地铁下穿时既有公路明挖隧道结构的影

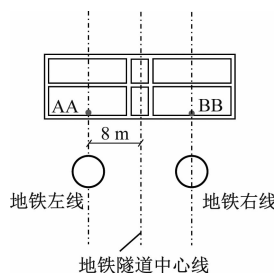
响,主要对既有明挖公路隧道结构底板(以下简称“结构底板”)的变形情况进行分析。沿既有明挖公路隧道的左车道、右车道结构底板纵向设置了左车道的纵向测线 AA 及右车道的纵向测线 BB,2 条测线的设置位置如图 5 所示。变形缝共 4 处,分别位于 y 向距隧道起点 0 m(1 号变形缝)、32 m(2 号变形缝)、64 m(3 号变形缝)、96 m(4 号变形缝)。

##### 3.1.1 车道结构底板 z 向沉降分析

图 6 为地铁左线开挖 6 个施工步完成后 2 条测线处的沉降情况,图 7 为地铁右线开挖 6 个施工步完成后 2 条测线处的沉降情况。



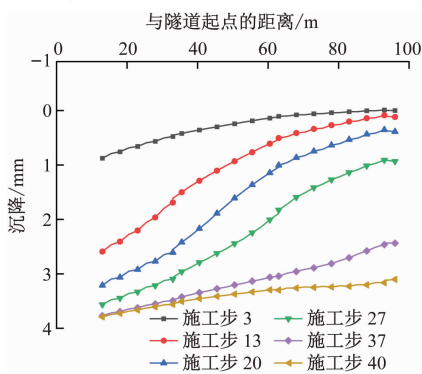
a) 测线设置立面示意图



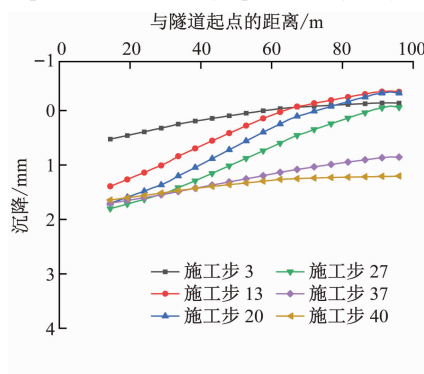
b) 测线设置横断面示意图

图 5 既有公路明挖隧道结构底板 2 条测线设置图

Fig. 5 Layout of two measurement lines for the structure bottom plate in the existing open-cut highway tunnel



a) 测线 AA 处(左车道)结构底板沉降



b) 测线 BB 处(右车道)结构底板沉降

图 6 左线开挖 6 个施工步完成后 2 条测线处的沉降情况

Fig. 6 Settlement at two measurement lines after completion of six construction steps in the left line excavation

由图 6 可知,左线开挖完成后,左车道结构底板沉降较大,其最大沉降量为 3.60 mm,不均匀沉降差(左线地铁隧道起点处与左线地铁隧道终点处的沉降差值)的最大值为 2.47 mm。由图 7 可知,右线开挖完成后,左右两车道结构底板的最大沉降量均为 5.20 mm,不均匀沉降差最终值均小于 1.00 mm。这说明既有明挖公路隧道整体在安全控制范围以内,其沉降以 z 向沉降为主,不均匀沉降较小。公路行车道结构底板沉降曲线在 2 号变形缝处有明显的斜率变化,这主要因为设置变形缝后,既有公路隧

道结构的整体性降低,进而改变了公路隧道的变形特征。

##### 3.1.2 车道结构底板 x 向位移分析

图 8 为左线开挖 6 个施工步完成后 2 条测线处的 x 向位移情况,图 9 为右线开挖 6 个施工步完成后 2 条测线处的 x 向位移情况。

由图 8、图 9 可知:车道结构底板 x 向位移在变形缝位置处呈现出明显的不连续性,这表明既有明挖公路隧道结构受变形缝影响,在地铁盾构下穿施工过程中出现了结构错动现象。在地铁左右线隧



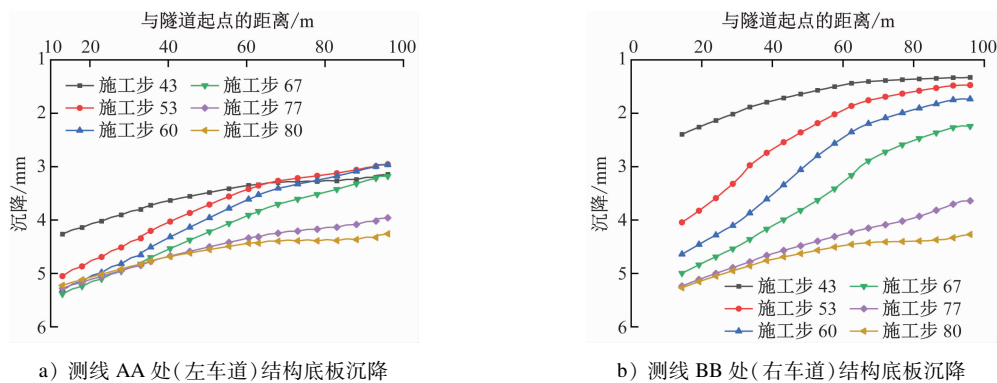
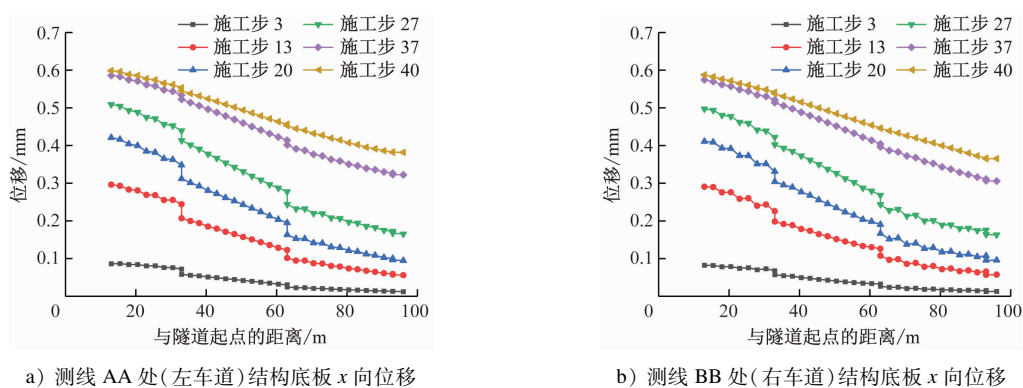


图7 右线开挖6个施工步完成后2条测线处的沉降情况

Fig. 7 Settlement at two measurement lines after completion of six construction steps in the right line excavation



注: x 向位移以图3的 x 轴正方向为正。

图8 左线开挖6个施工步完成后2条测线处的 x 向位移情况

Fig. 8 X-direction displacement at two measurement lines after completion of six construction steps in the left line excavation

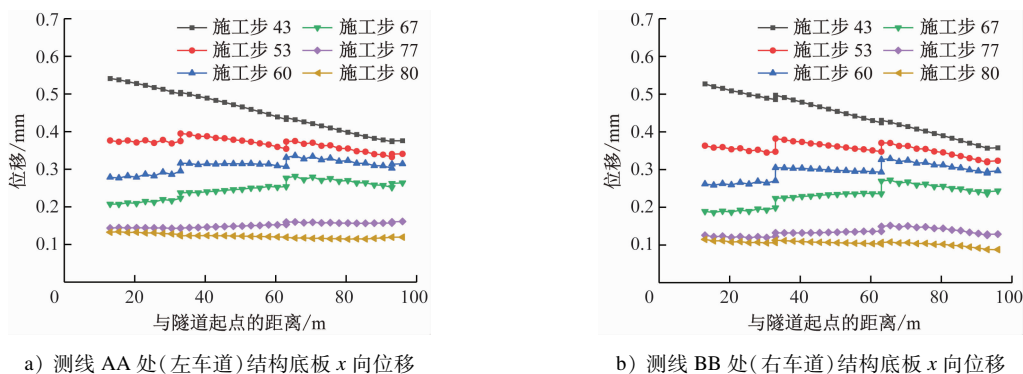


图9 右线开挖6个施工步完成后2条测线处的 x 向位移情况

Fig. 9 X-direction displacement at two measurement lines after completion of six construction steps in the right line excavation

道贯通过程中,车道结构底板处的  $x$  向位移先随地铁左线开挖整体向  $x$  向偏移,而后随右线开挖又回到起始位置,整个地铁盾构隧道施工完成后  $x$  向累计位移很小,约为  $0.1 \sim 0.6 \text{ mm}$ 。

### 3.1.3 车道结构底板结构应力分析

在近接施工中,地铁盾构开挖引起的地层损失会导致既有明挖公路隧道结构发生应力重分布。

本文先对模型进行初始地应力平衡计算,并以计算结果作为既有明挖公路隧道的初始应力状态。为了能与既有明挖公路隧道结构变形数据进行对比,本文仍以车道结构底板为主要研究对象,对其结构应力分布进行分析。

图10为左线开挖4个施工步完成后2条测线处的结构底板应力,图11为右线开挖4个施工步

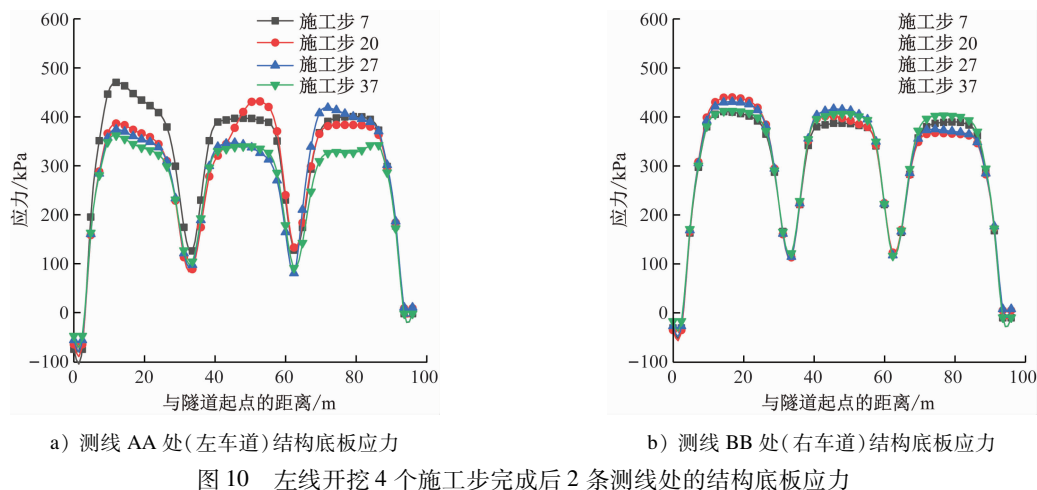


图 10 左线开挖 4 个施工步完成后 2 条测线处的结构底板应力

Fig. 10 Stress of structure bottom plate at two measurement lines after completion of four construction steps in the left line excavation

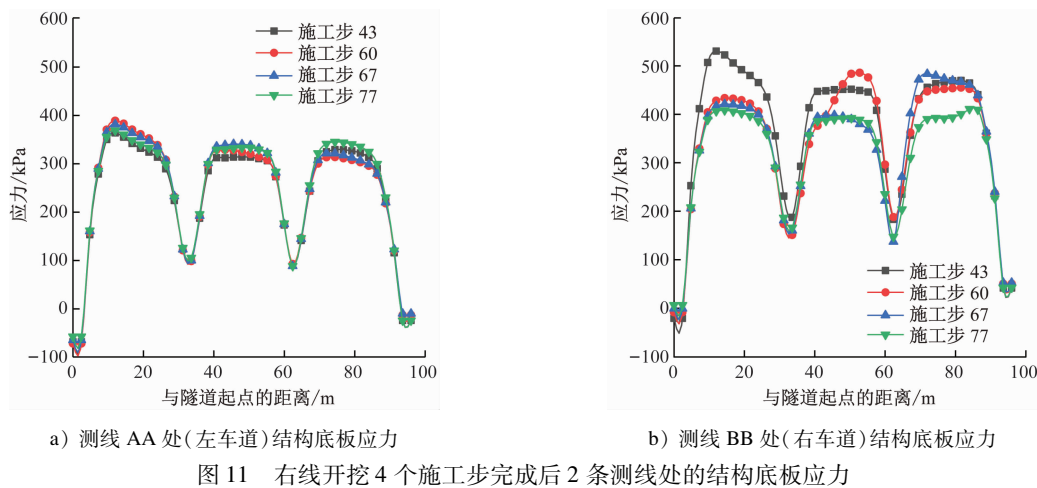


图 11 右线开挖 4 个施工步完成后 2 条测线处的结构底板应力

Fig. 11 Stress of structure bottom plate at two measurement lines after completion of four construction steps in the right line excavation

完成后 2 条测线处的结构底板应力。

由图 10、图 11 可知:在左线开挖过程中,左车道结构底板应力在变形缝处呈现明显的不连续现象,且变形缝处的结构应力并未明显降低。这是由于变形缝的存在使得既有明挖公路隧道由“刚接”转为“铰接”,进而改善了既有明挖公路隧道的受力特征。整个地铁下穿施工过程中,既有明挖公路隧道的拉应力始终小于 C40 混凝土容许拉应力值(2.39 MPa)。地铁左右线盾构隧道开挖完成后,既有明挖公路隧道的最大拉应力为 479.0 kPa。

### 3.2 变形缝力学响应分析

#### 3.2.1 变形缝位移变化分析

为减少边界效应的影响,以施工步 20 完成时测线 AA 的变形值、施工步 60 完成时测线 BB 的变形

值为研究对象,此时地铁盾构机刀盘分别位于既有明挖公路隧道左车道中心线的正下方、右车道中心线的正下方。选取有无变形缝 2 种模拟工况,对施工步 20 完成后、施工步 60 完成后 2 条测线的  $x$  向位移和  $z$  向沉降变化情况进行对比分析,其计算结果如图 12 所示。

由图 12 可知:若不设置变形缝,整个既有明挖公路隧道的结构完整性良好,各部分互为约束。地铁隧道开挖引起既有明挖公路隧道  $x$  向位移及  $z$  向位移均呈现相对平滑的“S 型”,结构各个位置变形相对较为平均。此外,施工步 60 完成后无变形缝工况下的  $z$  向沉降值明显低于有变形缝工况下的  $z$  向沉降值:施工步 20 完成时,二者的最大  $z$  向沉降差为 0.70 mm;施工步 60 完成时,二者的最大  $z$  向沉

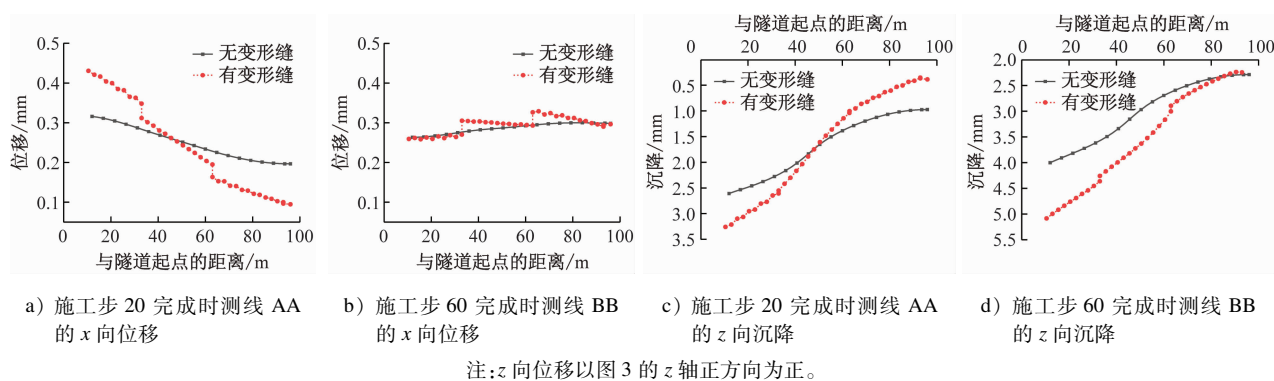


图 12 有无变形缝 2 种工况下 2 个施工步完成后 2 条测线的 x 向位移及 z 向位移

Fig. 12 X-direction displacement and z-direction settlement of two measurement lines after the completion of two construction steps under two working conditions with and without deformation joint

降差达 1.25 mm。

综上所述,在地铁盾构并行下穿施工的数值模拟过程中,考虑变形缝后,既有明挖公路隧道结构在 x 向位移、z 向沉降、底板不均匀沉降上的计算结果均有不同程度的增加。对有无变形缝 2 种工况下各向变形进行计算,其结果如表 2 所示。

表 2 有无变形缝 2 种工况下的各向变形

Tab. 2 Deformation in each direction under two working conditions with and without deformation joint

工况	x 向最大位移/mm	z 向最大沉降/mm	底板不均匀沉降/mm
无变形缝	0.32	3.92	1.71
有变形缝	0.44	5.17	2.89

由表 2 进一步计算可知:与无变形缝工况相比,有变形缝工况下 x 向最大位移、z 向最大沉降的增幅均大于 30%,底板不均匀沉降的增幅达到 69%。因此,应依据考虑变形缝时的数值模拟计算结果,制定案例工程的加固措施及监控量测方案,以确保地铁盾构并行下穿施工过程中既有明挖公路隧道的正常运营。

### 3.2.2 变形缝应力变化分析

为防止变形缝两侧沉降差造成隧道渗漏,对 2 号变形缝两侧结构底板 7 个观测点的沉降与应力状态进行研究。2 号变形缝断面处 7 个观测点的设置方案如图 13 所示。

图 14 为左线贯通时 2 号变形缝断面处 7 个观测点的沉降差。由图 14 可知:2 号变形缝两侧不均匀沉降随地铁盾构掘进变化明显。左侧观测点两侧沉降差在左线地铁盾构掘进至 2 号变形缝正下方

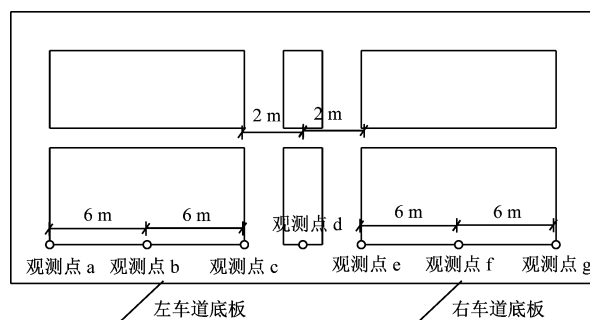
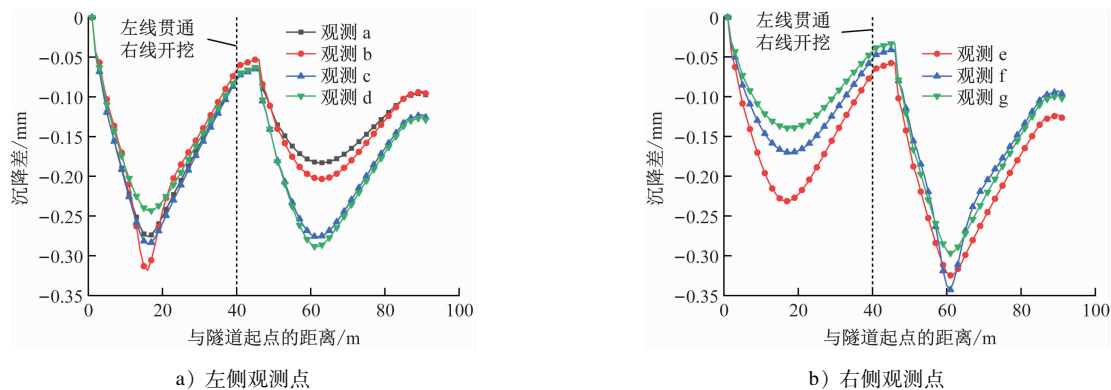


图 13 2 号变形缝处 7 个观测点设置图

Fig. 13 Layout of seven observation points at No. 2 deformation joint

时达到最大,沉降差最大值为  $-0.33$  mm;右侧观测点两侧沉降差在右线地铁盾构掘进至 2 号变形缝正下方时达到最大,沉降差最大值为  $-0.35$  mm。这 2 个沉降差均小于 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》规定的最大沉降差 (4 mm)。地铁盾构掘进完成后,2 号变形缝两侧沉降差降至最小。

图 15 为 2 号变形缝随地铁盾构掘进的应力状态发展历程曲线。由图 15 可知:由于结构变形缝两侧存在沉降差,2 号变形缝始终受到拉应力和剪应力的影响。其中:左线开挖引起 2 号变形缝的最大拉应力为 45.8 kPa,最大剪应力为 250.7 kPa;右线开挖引起 2 号变形缝的最大拉应力为 49.1 kPa,最大剪应力为 250.8 kPa。当地铁盾构掘进至 2 号变形缝正下方时,由于 2 号变形缝两侧结构沉降差缩小,2 号变形缝承担的拉应力及剪应力也随之降至最小。随后,2 号变形缝承担的拉应力及剪应力又逐渐回升。在整个地铁盾构下穿施工过程中,变形缝所受拉应力、剪应力均小于 GB 50108—2018《地



注:沉降差指变形缝观测点处远离隧道起点一侧结构底板沉降值与靠近隧道起点一侧结构底板沉降值之差;为对比分析,观测点 d 暂列入左侧观测点。

图 14 左线贯通时 2 号变形缝处 7 个观测点的沉降差

Fig. 14 Settlement difference of seven observation points at No. 2 deformation joint when the left line is connected

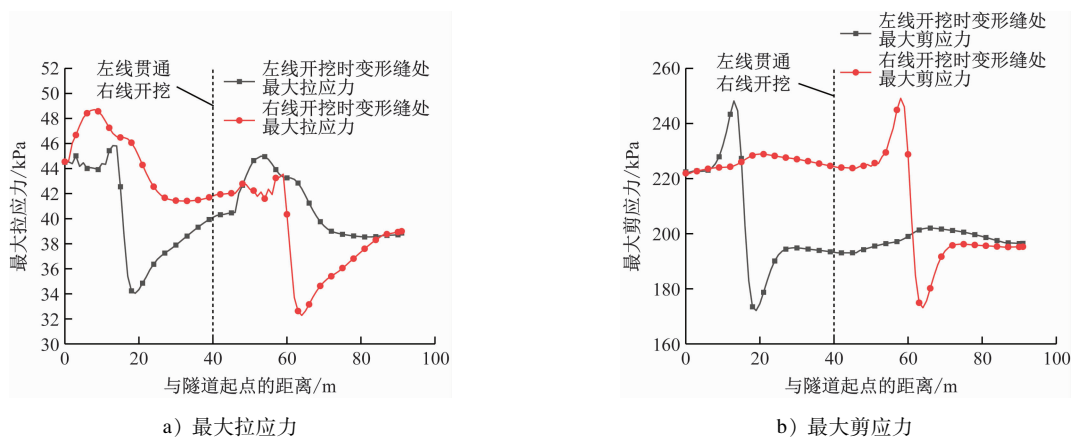


图 15 2 号变形缝随地铁盾构掘进的应力状态发展历程曲线

Fig. 15 Stress state development curves of No. 2 deformation joint with metro shield tunneling

下工程防水技术规范》规定的控制值(分别为 500 kPa、440 kPa),这说明案例工程的变形缝设计符合防水要求。但是,最大剪应力达到了预警值的 57%,由此可认为,变形缝处抗剪性能受到了一定影响。

#### 4 结语

本文建立了考虑变形缝影响的地铁左右线盾构隧道并行下穿既有明挖公路隧道数值模型,分析了有变形缝存在情况下地铁左右线盾构并行下穿对既有明挖公路隧道的影响,得出结论如下:

1) 在变形缝处,既有明挖公路隧道结构底板沉降曲线斜率发生了明显变化,结构底板的  $x$  向位移及应力均呈现出明显的不连续性。与无变形缝工况相比,有变形缝工况降低了既有明挖公路隧道结构的整体性,改变了其变形及受力特征。

2) 相比于无变形缝,有变形缝工况下既有明挖公路隧道结构的  $x$  向位移最大值与  $z$  向沉降最大值的增幅均超过 30%,底板不均匀沉降的增幅达 69%。因此,在进行地铁盾构隧道并行下穿既有结构施工时,须考虑变形缝对既有公路隧道结构安全性的影响。

3) 有变形缝工况下,变形缝两侧的沉降随地铁盾构掘进呈明显变化,并在地铁盾构掘进至该变形缝正下方时沉降达到最大值。变形缝始终受到拉应力及剪应力的影响,最大剪应力达预警值的 57%,因此,在实际施工时,应在变形缝处安装应力计,以实时监测变形缝处的拉应力及剪应力,一旦应力超过预警值,立即停止施工,并采取合适的施工补救措施。

#### 参考文献

[1] 张晓清,张孟喜,李林,等.多线叠交地铁盾构隧道近距离穿



- 越施工扰动机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1133.
- ZHANG Xiaoqing, ZHANG Mengxi, LI Lin, et al. Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(4): 1133.
- [2] 魏纲, 齐永洁, 吴华君, 等. 地铁盾构下穿既有地铁隧道环向围压及受力变化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(12): 3515.
- WEI Gang, QI Yongjie, WU Huajun, et al. Changes in circumferential pressure and stresses in existing tunnels caused by tunnel crossing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(12): 3515.
- [3] 温科伟, 刘树亚, 杨红坡. 基于小应变硬化土模型的基坑开挖对下穿地铁隧道影响的三维数值模拟分析[J]. 工程力学, 2018, 35(增刊1): 80.
- WEN Kewei, LIU Shuya, YANG Hongpo. Three-dimensional numerical simulation analysis of the influence of foundation pit excavation on underpassing subway tunnel based on small strain hardened soil model [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(S1): 80.
- [4] 于宏福, 高登, 李海峰. 地铁盾构区间下穿有轨电车道床沉降分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(6): 63.
- YU Hongfu, GAO Deng, LI Haifeng. Analysis on the settlement of tram track bed with undercrossing metro shield tunnels[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(6): 63.
- [5] JIN D, YUAN D, LI X, et al. An in-tunnel grouting protection method for excavating twin tunnels beneath an existing tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 27.
- [6] WU B, ZHANG Z, HUANG W. Comparison and selection of reinforcement schemes for shield tunnelling close crossing high-speed railway viaduct group[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(4): 042119.
- [7] 马文辉, 杨成永, 彭华, 等. 大直径泥水地铁盾构下穿地铁挡墙路基沉降控制[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 44.
- MA Wenhui, YANG Chengyong, PENG Hua, et al. Settlement control on retaining wall embankment affected by underneath traversing large-diameter slurry shield tunnels[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 44.
- [8] 张浩. 新建地铁隧道对既有隧道影响的快速分析平台研发及应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- ZHANG Hao. Development and application of a rapid analysis platform for the impact of new subway tunnels on existing tunnels [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- 收稿日期:2022-06-30 修回日期:2022-11-02 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-06-30 Revised:2022-11-02 Published:2024-09-10
- 第一作者:张亮亮,高级工程师,25010849@qq.com  
通信作者:傅金阳,副教授,jy.fu@csu.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
- 
- (上接第30页)
- HU Zuoan, XIA Yiming, CAI Jia, et al. Optimization of urban rail transit operation adjustment based on multiple strategies under delay[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 1664.
- [11] 解熙, 蒲琪. 城市轨道交通列车延误统计指标及评价指标体系研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 75.
- XIE Xi, PU Qi. Research on statistics index and evaluation index system of urban rail transit delays[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 75.
- [12] JIANG Z B, XU C H, ZHANG D Q, et al. Evaluating rail transit timetable using big passengers' data[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2016, 82(1): 144.
- [13] 江志彬, 季婷婷. 基于客流影响的城市轨道交通列车运行调整策略[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(1): 39.
- JIANG Zhibin, JI Tingting. URT train regulation strategy based on passenger flow influence[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(1): 39.
- [14] JIANG Z B, LI F, XU R H, et al. A simulation model for estimating train and passenger delays in large-scale rail transit networks[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(12): 3603.
- 收稿日期:2022-06-07 修回日期:2022-08-05 出版日期:2024-09-10  
Received:2022-06-07 Revised:2022-08-05 Published:2024-09-10
- 第一作者:李洪运,博士研究生,hylicn@foxmail.com  
通信作者:江志彬,副教授,jzb@tongji.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

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www.umt 1998.tongji.edu.cn