

盾构隧道下穿城市既有道路施工参数影响分析

黄夏明¹, 程尧², 张永犇³, 王金昌⁴, 李昕洋³

- (1. 浙江交工国际工程有限公司, 杭州 311399;
2. 上海同岩土木工程科技股份有限公司, 上海 200082;
3. 沈阳建筑大学 交通与测绘工程学院, 沈阳 110168; 4. 浙江大学 交通工程研究所, 杭州 310027)

摘要: 为深入研究盾构隧道下穿城市既有道路时对路面结构的影响, 以杭州市某盾构隧道下穿城市既有道路工程为背景, 利用 PLAXIS 3D 平台建立隧道、土体及地表道路相互作用的三维有限元模型, 分析土体损失率、注浆压力及开挖直径等施工参数对既有道路的影响。结果表明: 路面的最大沉降出现在盾构隧道的正上方; 盾构机开挖施工时, 道路结构会产生二次沉降; 当施工参数, 土体损失率为 0.1%、开挖直径为 10 m、注浆压力为 300 kPa 时, 路面最大沉降值仅为 7.919 mm, 能够满足公路的运营安全要求, 进而为工程提供建议施工参数。

关键词: 盾构隧道; 城市既有道路; 土体损失率; 沉降变形

中图分类号: U455.43 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 05-0125-09

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.019

Analysis of the Influence of Construction Parameters on Shield Tunnel Underpass of Existing Urban Roads

HUANG Xiaming¹, CHENG Yao², ZHANG Yongben³, WANG Jinchang⁴, LI Xinyang³

- (1. ZCCC International Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311399, China;
2. Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200082, China;
3. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
4. Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to further study the impact of shield tunnel excavation on the pavement structure of existing urban roads, a three-dimensional finite element model was established using the PLAXIS 3D platform, focusing on a shield tunnel project that passed underneath existing urban roads in Hangzhou. This model analyzed the effects of construction parameters, such as soil loss rate, grouting pressure, and excavation diameter, on the existing road. The results indicate that the maximum settlement of the pavement occurs directly above the shield tunnel. During the excavation process of the shield machine, secondary settlement of the road structure takes place. When the construction parameters are a soil loss rate of 0.1%, an excavation diameter of 10 m, and a grouting pressure of 300 kPa, the maximum settlement value of the pavement is only 7.919 mm, which meets the operational safety requirements for the road, thereby providing recommended construction parameters for the project.

Key words: shield tunnel; existing urban roads; soil loss rate; settlement deformation

项目来源: 浙江省交通运输研发项目 (202303)。

作者简介: 黄夏明 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路工程。

收稿日期: 2024-12-21

道桥技术

0 引言

随着城市地下空间开发的不断深入,盾构隧道下穿城市既有道路便是常见工况之一。在盾构开挖过程中,隧道上方土体由于施工扰动的原因,导致原有的地层应力平衡被破坏^[1]。若盾构开挖导致的土体沉降超限,就可能引发地表道路出现路面开裂、塌陷、隆起以及翻浆等破坏现象,从而影响道路的安全使用,该破坏过程是隧道、土体和道路三者共同作用的结果^[2-3]。为了保证城市既有道路的正常通行,需要研究盾构隧道下穿城市既有道路施工过程中,不同施工参数对城市既有道路的影响。

目前,国内外计算盾构隧道施工引起的土体变形,主要依赖数值模拟、现场监测、理论解析和模型试验等方法。众多学者利用不同软件(如 ABAQUS、Midas GTS NX)构建模型,重点研究了地层特性与几何参数的影响。李攸宜^[4]利用 ABAQUS 有限元软件对盾构隧道在复合地层中的施工过程进行模拟,分析了硬层比、线间距及盾构掘进次序对地表沉降的影响,结果表明硬层比、线间距对地表沉降的影响较大,而对盾构掘进次序的影响较小;Hu 等^[5]依据实际检测数据建立软土地层中双曲线盾构隧道的数值模型,分析了隧道施工对地表沉降与隧道变形的影响,并提出了曲率半径小于 800 m 的双曲线盾构隧道施工地表沉降槽的经验预测方法;Zeng 等^[6]利用有限元软件建立下穿平行双线盾构隧道的三维有限元数值模型,分析了隧道施工对上覆地层变形的影响,并对平行双线隧道开挖引起地表以下 Z 深度处地层沉降的估算公式进行了推导,为工程提出建议参数;Lei 等^[7]利用数值计算、有限元分析以及现场监测等方法,建立了有限元模型,分析了隧道附近地层的变形响应;张婧等^[8]利用 Midas GTS NX 建立有限元模型,考虑了盾构掘进方向与复合地层走向的夹角以及复合地层倾角等因素,对盾构隧道在复杂地层中施工对地表沉降的影响展开了分析,并给出了规律性总结及建议参数;张家贺等^[9]基于工程监测数据,针对双孔隧道下穿道路及粉细砂地层,揭示了沉降呈“W”形、后线施工加剧先线沉降的现象,据此建立了双孔 Peck 公式;Krishna 等^[10]利用 STAAD Pro 和 Rocscience 软件,

模拟了不同形状隧道在多种地层与荷载下的响应,为城市区域沉降预测及建筑安全评估提供了普适性分析思路;Gong 等^[11]则针对盾构下穿建筑物工况,基于推广的明德林解发展了一套计算方法,量化了建筑物刚度和附加荷载的综合影响机制,强调实际应用中需同时考虑两者。大量学者研究证明,在盾构隧道施工过程中,土体开挖、管片支护、同步注浆等施工过程将不可避免引起周围土体的沉降,进而引发地表道路产生不同程度的破坏^[12-13]。因此在施工过程中采用合理的施工参数能够在一定程度上降低由于盾构隧道施工引发的城市既有道路的沉降^[14-15]。

上述研究虽然为实际施工提供了一些技术参考,但鲜有学者采用 HSS 本构模型对双线盾构隧道施工过程进行模拟,探究盾构隧道施工参数对城市既有道路的影响。依托杭州市某盾构隧道下穿城市既有道路工程,考虑土体损失率、注浆压力、开挖直径等施工参数影响,采用 HSS 本构模型通过 PLAXIS 3D 平台对双线盾构隧道下穿城市既有道路的施工过程建立有限元模型,并结合实测数据分析隧道施工对城市既有道路的沉降与变形影响,进而为工程提出建议参数,为类似工程提供参考经验。

1 工程概况

1.1 工程背景

杭州市环城北路—天目山路提升改造工程双线盾构下穿某城市既有道路区段工程采用泥浆平衡式盾构,隧道全长 5 460 m,施工段北线盾构隧道埋深约为 20.7 m,南线盾构隧道埋深约为 20.3 m。隧道管片壁厚 0.55 m,每环由 10 块组成,环宽 2.00 m,楔形量 50 mm(双面),错缝拼装的通用衬砌环,每环管片之间采用螺栓连接。

隧道断面基本为上软下硬的复合地层。其中北线隧道断面中土质主要包括⑥₁淤泥质黏土、⑥₂黏土、⑦₁粉质黏土、⑨₁含砂粉质粘土、⑨₂砾砂、⑩₁黏土等土质组成。南线隧道断面中土质主要包括⑥₁淤泥质黏土、⑥₂黏土、⑦₁粉质黏土、②₀₁层:全风化晶屑玻屑凝灰岩、②₀₂层:强风化晶屑玻屑凝灰岩。

1.2 盾构隧道与既有道路的关系及监测点布置

既有城市道路为双向六车道，横断面为 23.50 m×0.56 m 的矩形，路面厚度为 560 mm，宽度为 2 350 mm，设计时速为 60 km/h。具体监测点位布置及隧道与既有道路的位置关系如图 1 所示，在双线隧道中轴线两侧，距双线隧道中心 1、3、7、11、15、19、27、35、50、70、100 m 处共对称布置 23 个沉降监测点位。

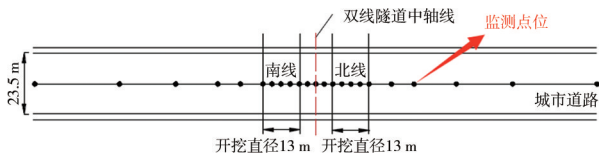


图 1 双线盾构隧道下穿既有道路位置图
Fig. 1 Location map of the twin-line shield tunnel underpassing existing roads

2 三维有限元分析

2.1 数值模型建立

通过 PLAXIS 3D 平台建立有限元模型进行分析，考虑盾构北、南两线第 345 ~ 403 环管片顶推施工先模拟北线盾构施工，待北线穿过控制保护区后，再模拟南线盾构施工。以盾构隧道纵向为 x 轴，横向为 y 轴，竖向为 z 轴建立三维有限元模型，为了消除边界条件的影响，模型尺寸取 118 m×200 m×86 m ($x \cdot y \cdot z$)，边界条件为模型底部完全固定，四周法向约束，模型网格采用空间四面体 10 节点单元划分，共 127 021 个单元，186 986 个节点。有限元整体模

型如图 2 所示。道路与隧道的位置关系如图 3 所示。按照实际施工步序将施工过程的数值模拟划分为 127 个工况。

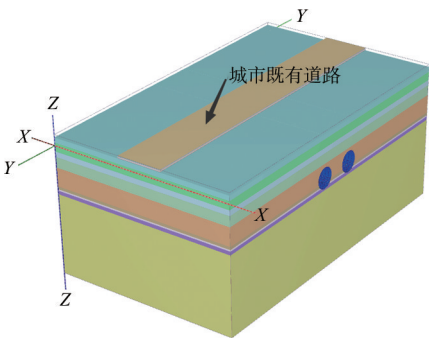


图 2 有限元整体模型
Fig. 2 Finite element global model

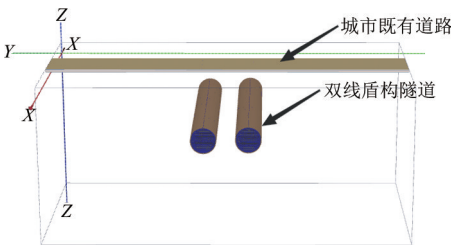


图 3 道路与双线盾构隧道位置关系
Fig. 3 Positional relationship between the road and the twin-line shield tunnel

2.2 模型参数的选取

土体采用实体单元进行模拟。有限元模型中的地层参数全部来源于依托工程岩土勘察报告中的实际数据，见表 1。

表 1 土体本构模型参数表
Table 1 Parameters of soil constitutive model

地层	地层名称	黏聚力 C'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/\text{(^{\circ})}$	割线模量 E_{50}/MPa	切线模量 $E_{\text{ocel}}/\text{MPa}$	应变卸载/重加载模量 E_{ur}/MPa	剪切模量 G/MPa	刚度应力水平 相关幂指数/ m
①	填土	2	26	2.5	2.5	10.0	20.0	0.8
② ₂	粉质黏土	5	25	5.0	5.0	35.0	70.0	0.8
③ ₁	粉土夹淤泥质土	5	26	6.7	6.7	33.5	67.0	0.8
③ ₂	砂质粉土	5	29	11.7	11.7	58.5	117.0	0.5
④ ₁	淤泥质黏土	3	23	2.7	2.7	24.3	24.3	0.8
④ ₂	粉质黏土夹粉土	4	26	4.2	4.2	29.4	58.8	0.8
⑥ ₁	淤泥质黏土	3	23	2.9	2.9	26.1	52.2	0.8
⑥ ₂	黏土	3	24	3.2	3.2	22.4	44.8	0.8
⑦ ₁	粉质黏土	5	26	6.5	6.5	45.5	91.0	0.8
⑦ ₄	含黏性土砾砂	2	32	9.0	9.0	36.0	72.0	0.5
⑧ ₂	黏土	4	25	4.4	4.4	30.8	61.6	0.8
⑩ ₁	黏土	4	25	4.7	4.7	32.9	65.8	0.8
⑩ ₆ ₁	含砾粉质黏土	5	28	6.3	6.3	44.1	88.2	0.8
⑳ ₂	强风化晶屑玻屑凝灰岩	50	20	18.0	18.0	54.0	108.0	0.8
⑳ ₃	中风化晶屑玻屑凝灰岩	100	25	40.0	40.0	120.0	240.0	0.8

道桥技术

3 基于参数反分析确定土体损失率 C

3.1 确定土体损失率 C 的计算模型

对北线已建 NK3+890~NK3+730 段建立三维数值模型,模型尺寸取 160 m×200 m×86 m ($x \cdot y \cdot z$),共 118 696 个单元,170 084 个节点。有限元整体模型如图 4 所示。按照实际施工工序将施工过程的数值模拟划分为 86 个工况。

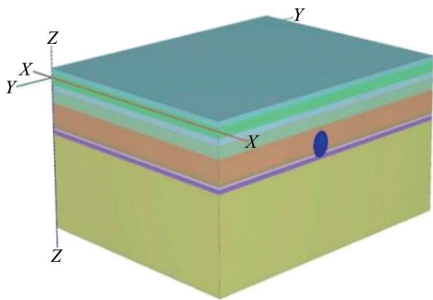


图 4 参数反分析有限元模型

Fig. 4 Parameter inverse analysis finite element model

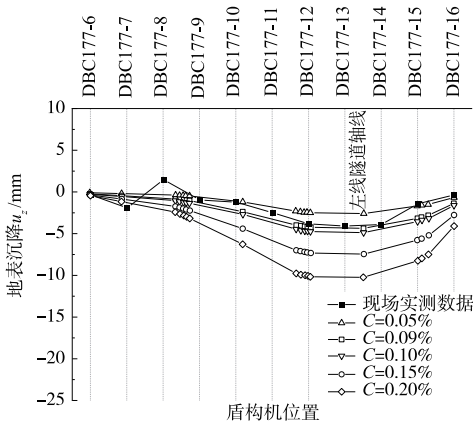
在 NK3+890~NK3+730 段计算模型的基础上,通过调整模型土体损失率 C 进行多工况模拟反分析。其中,反分析中土体损失率 C 的取值见表 2。

表 2 土体损失率 C
Table 2 Soil loss rate C

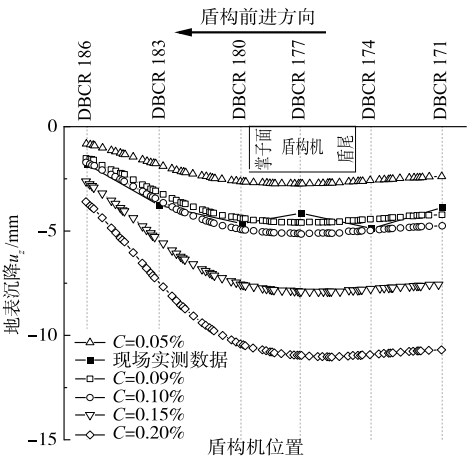
工况	1	2	3	4	5
土体损失率 C /%	0.05	0.09	0.10	0.15	0.20

3.2 计算结果与实测对比分析

地表沉降计算值与实测值对比图如图 5 所示。当土体损失率 $C=0.10\%$ 时,计算值与实测值较为接近,后续采用该土体损失率 C 进行注浆压力对盾构下穿城市既有道路的影响分析。



(a) 地表横向沉降



(b) 地表纵向沉降

图 5 地表沉降计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of calculated and measured surface settlement values

4 盾构开挖引起的路面沉降变形研究

遵循单一变量原则,即在保持盾构隧道模型尺寸不变的条件下,通过调整模型中的施工参数来实现盾构隧道安全穿越城市既有道路的模拟。其中,土体和路面结构分别采用 HSS 本构模型和线性弹性模型。

4.1 土体损失率对盾构隧道开挖引起的路面沉降变形分析

通过调整模型土体损失率 C 进行多工况分析。其中,土体损失率影响分析中土体损失率 C 的取值见表 3。

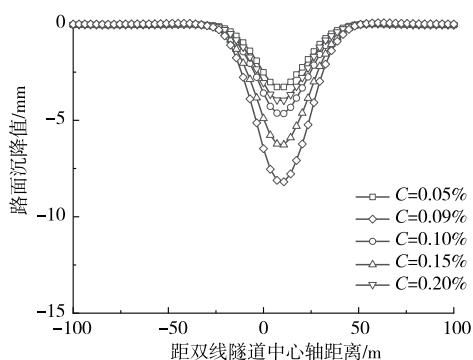
表 3 土体损失率 C
Table 3 Soil loss rate C

工况	1	2	3	4	5
土体损失率 C /%	0.05	0.09	0.10	0.15	0.20

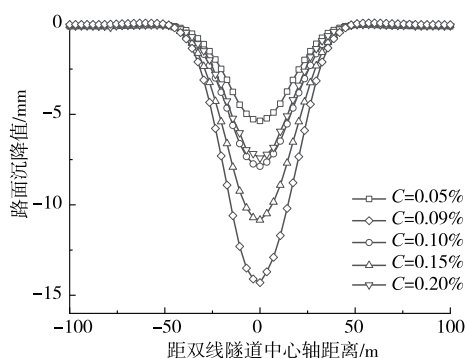
由图 6 可知,不同工况下其路面最大沉降值均出现在南、北隧道中轴线正上方部分,且曲线由宽变窄,曲线整体逐渐下移,说明土体损失率越小既有道路的整体性越好。

由图 7 可知,随着土体损失率的增大,其路面最大沉降值也随之增大,呈现近似线性关系。且当土体损失率由 0.05% 增大至 0.20% 时,路面最大沉降变化率也逐渐增大。当土体损失率为 0.05% 时,北线盾构施工完成后与南线盾构施工完成后的路面整体沉降值由 -3.034 mm 增大到 -5.396 mm,变化了

道桥技术



(a) 北线施工完成后路面沉降曲线



(b) 南线施工完成后路面沉降曲线

图 6 不同土体损失率下路面沉降变化曲线

Fig. 6 The variation curve of pavement settlement under different soil loss rates

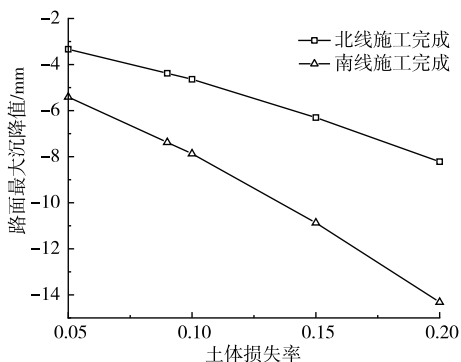


图 7 不同土体损失率下路面最大沉降变化曲线

Fig. 7 The maximum settlement curve of pavement under different soil loss rate

2.362 mm。而当土体损失率增加到 0.20% 时, 北线施工完成后与南线施工完成后路面最大沉降由 -8.188 mm 增大到 -14.26 mm, 变化了 6.072 mm。说明土体损失率越小, 路面结构越稳定, 二次盾构对既有道路影响越小。

由图 8 可知, 随着土体损失率的不断增大, 北线

盾构贯穿至南线盾构至 381 环的曲线斜率逐渐增大。随着盾构机的前进, 既有路面的沉降值会增加。盾构机顶推至 381 环时盾构机刚好开挖至通过既有道路, 当北线盾构开挖通过既有道路至南线盾构开挖通过既有道路时路面沉降值变化较大。而当盾构机通过后直至盾构贯穿, 北线施工和南线施工对既有道路路面所产生的沉降值变化曲线斜率变化微小, 较为平缓, 说明盾构机通过后对既有道路路面后续沉降变形影响极小。

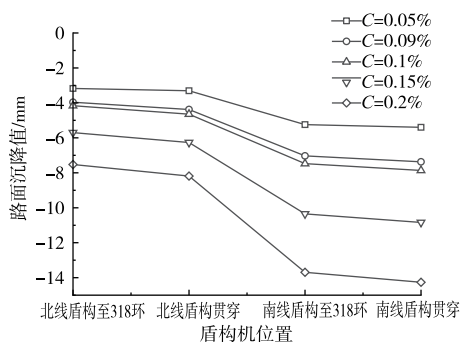


图 8 不同盾构位置下路面沉降变化曲线

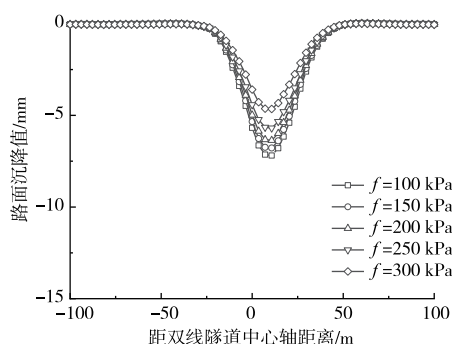
Fig. 8 Change curve of pavement settlement under different shield positions

4.2 注浆压力对盾构隧道开挖引起的路面沉降变形分析

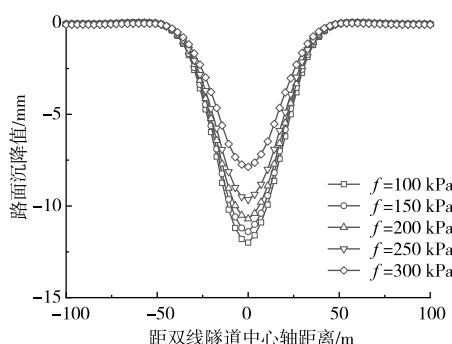
根据由 NK3+890~NK3+730 段参数反分析得到的土体损失率 $C=0.10\%$ 对盾构下穿城市既有道路进行数值模拟。遵循单一变量原则, 通过增加注浆压力的大小, 分析不同注浆压力下路面的沉降变形规律。在实际工程中, 盾构施工所采用的注浆压力一般比注浆点的静止水土压力高 1.1~1.2 倍, 注浆压力范围为 0.1~0.3 MPa。故选取 100、150、200、250、300 kPa 共五种注浆压力进行研究分析, 为简化计算, 在数值模拟中采用均匀注浆。

由图 9 可知, 南北两线隧道分别施工完成后, 路面最大沉降均出现在所施工隧道的正上方位置处。路面沉降槽形状几乎没有改变。当注浆压力小于 250 kPa 时, 增大注浆压力对路面沉降影响不大, 而当注浆压力从 250 kPa 增大到 300 kPa 时, 路面最大沉降值相对明显减小。此时北线盾构施工完成和南线施工完成的路面沉降最大值分别为 -7.19 和 -11.8 mm。

道桥技术



(a) 北线施工完成后路面沉降曲线



(b) 南线施工完成后路面沉降曲线

图9 不同注浆压力下路面沉降变化曲线

Fig. 9 Change curve of pavement settlement under different grouting pressure

由图 10 可知,路面最大沉降随注浆压力的增大而减小,呈现近似线性关系。当注浆压力由 100 kPa 增大至 250 kPa 时北线施工完成后与南线施工完成后路面最大沉降值变化曲线斜率几乎相同,而由 250 kPa 增大至 300 kPa 时南北两线施工完成后路面最大沉降值曲线斜率明显增大。当注浆压力为 100 kPa 时,北线盾构施工完成后与南线盾构施工完成后的路面整体沉降值由 -6.791 mm 增大到 -11.98 mm,变化了 5.189 mm。而当注浆压力增加到 300 kPa 时,北线施工完成后与南线施工完成后路面最大沉降由 -4.645 mm 增大到 -7.866 mm,变化了 3.221 mm。说明注浆压力增大到 300 kPa 时,盾构施工时路面结构相对更加稳定,即二次盾构对既有道路影响更小。

由图 11 可知,随着盾构机的不断向前推进,既有道路路面沉降值不断增大,盾构机顶推至 381 环时盾构机刚好开挖至通过既有道路,当北线盾构开挖通过既有道路至南线盾构开挖通过既有道路时路面沉降值变化较大。而当盾构机通过后直至盾构贯穿,

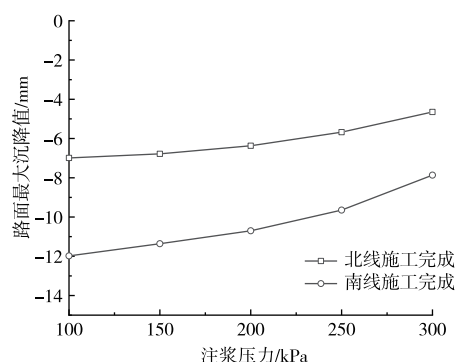


图 10 不同注浆压力下路面最大沉降变化曲线

Fig. 10 Maximum settlement change curve of pavement under different grouting pressure

北线施工和南线施工对既有道路路面所产生的沉降值变化曲线斜率变化微小,较为平缓,说明盾构机通过后对既有道路路面后续沉降变形影响极小。

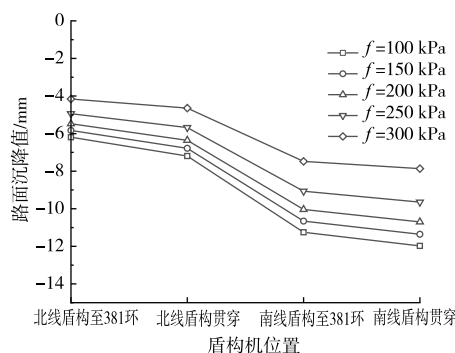


图 11 不同盾构位置下路面沉降变化曲线

Fig. 11 Change curve of pavement settlement under different shield positions

由图 12 可知,盾构机开挖至通过既有道路时,路面沉降显著发生,且沉降贯穿施工全过程。当盾构机通过后直至盾构贯穿,北线施工和南线施工对既有道路路面所产生的沉降差分别为 0.484 和 0.242 mm,既有道路路面后续沉降变形较小。南线盾构施工完成时与北线盾构贯穿时路面沉降值增大 3.274 mm,是由于北线盾构施工完成后南线开始施工,当南线盾构下穿既有道路时,对既有城市道路产生二次影响,道路沉降值进一步增大。

4.3 开挖直径对盾构隧道开挖引起的路面沉降变形分析

隧道开挖直径 D 拟定为 6、8、10、13 m 四种尺寸。基于四种不同开挖尺寸建立盾构隧道下穿城市既有道路的施工模型,并分析不同开挖直径对路面沉降的影响规律。

道桥技术

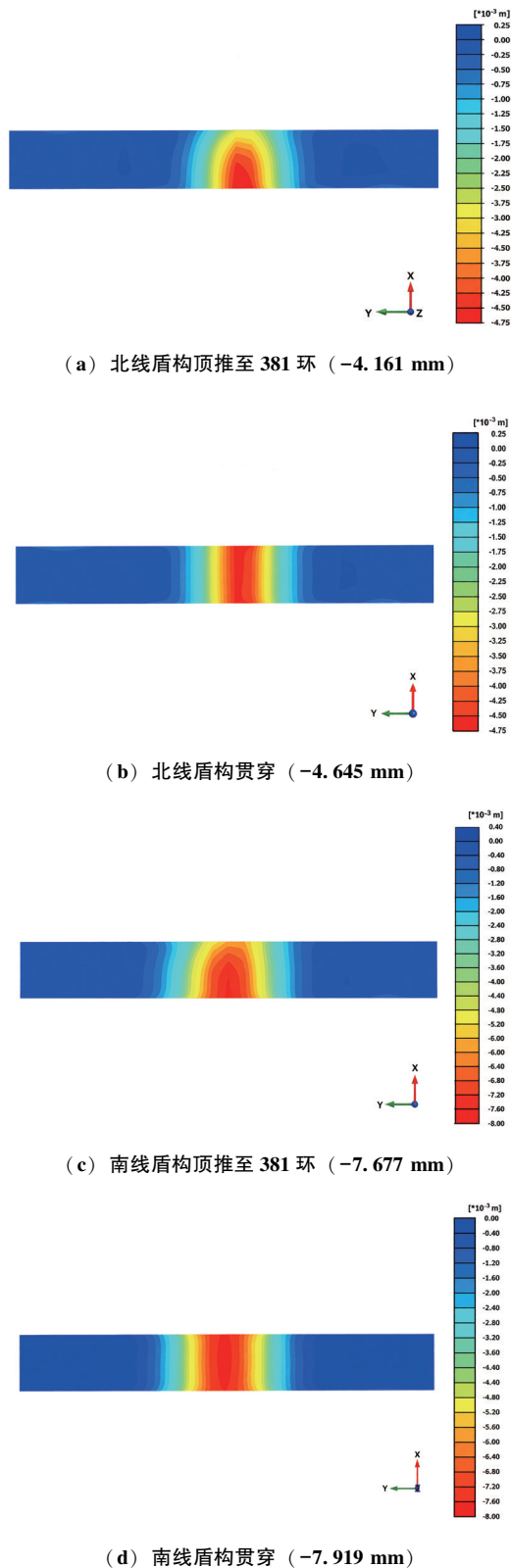


图 12 不同工序下路面沉降云图

Fig. 12 Cloud chart of pavement settlement under different processes

由图 13 可知,随着开挖直径大小的不断增大,路面沉降随之增大,且不同工况下其路面最大沉降值均出现在南、北隧道中轴线正上方部分,曲线由宽逐渐变窄,当开挖直径小于 10 m 时,开挖直径对路面沉降的影响较小,而当开挖直径大于 10 m 时,曲线整体发生突变,说明此时开挖直径对路面沉降变形影响显著。

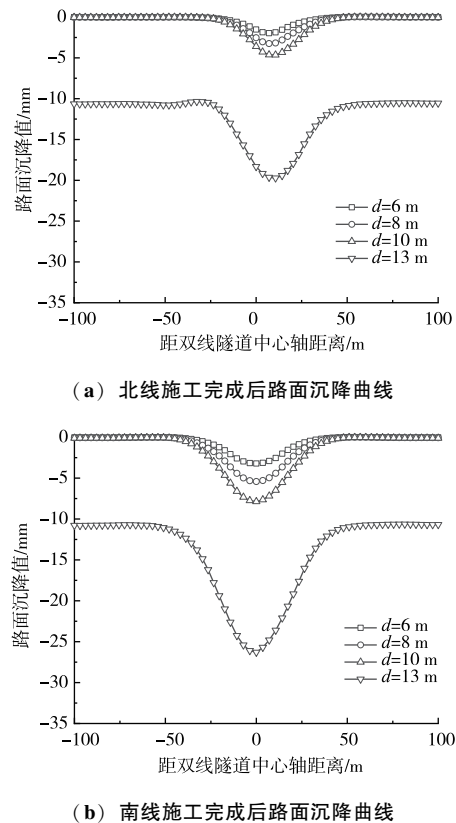


图 13 不同开挖直径下路面沉降变化曲线

Fig. 13 Change curve of pavement settlement under different excavation diameters

由图 14 可知,随着开挖直径的增大,其路面最大沉降也随之增大,呈现近似线性关系。且当开挖直径由 6 m 增大至 10 m 时,路面最大沉降变化率较低。当开挖直径由 10 m 增大到 13 m 时,路面最大沉降变化率增长显著,路面最大沉降值由 -7.919 mm 突变为 -26.36 mm。当开挖直径为 6 m 时北线盾构施工完成后与南线盾构施工完成后的路面整体最大沉降值由 -2.002 mm 增大到 -3.244 mm,变化 1.242 mm。而当开挖直径增加到 13 m 时,北线施工完成后与南线施工完成后路面最大沉降由 -20.16 mm 增大到 -26.36 mm,变化 6.2 mm。说明随着开挖直径的增大,二次盾构对

道桥技术

既有道路路面沉降影响也随之增大。

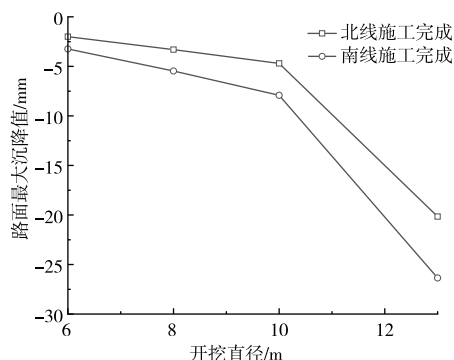


图 14 不同开挖直径下路面最大沉降变化曲线

Fig. 14 The maximum settlement curve of pavement under different excavation diameters

由图 15 可知,随着开挖直径的不断增大,北线盾构贯穿至南线盾构至 381 环的曲线斜率逐渐增大,对路面二次沉降的影响也随之增大。开挖直径为 6 m 时,路面沉降值由 -1.944 mm 增大到 -3.244 mm,而开挖直径为 13 m 时,盾构隧道北线施工完成至南线盾构通过既有道路,路面沉降变形较大,由 -20.16 mm 增大到 -26.36 mm。说明开挖直径越小,既有道路结构越稳定。且随着盾构机的不断向前推进,既有道路路面沉降值不断增大,盾构机顶推至 381 环时盾构机刚好开挖至通过既有道路,当北线盾构开挖通过既有道路至南线盾构开挖通过既有道路时路面沉降值变化较大。而当盾构机通过后直至盾构贯穿,北线施工和南线施工对既有道路路面所产生的沉降值变化曲线斜率几乎无变化,曲线趋向水平,说明盾构机通过后对既有道路路面后续沉降变形影响微乎其微。

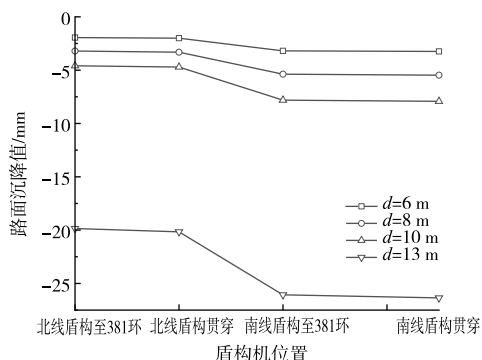
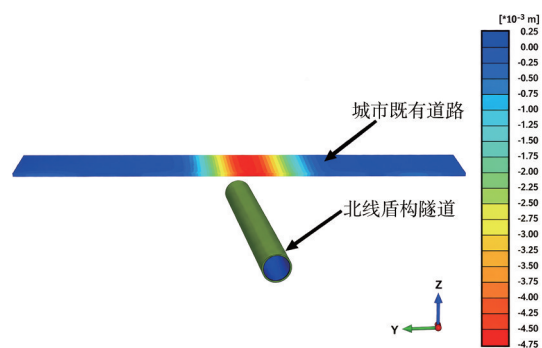


图 15 不同盾构位置下路面沉降变化曲线

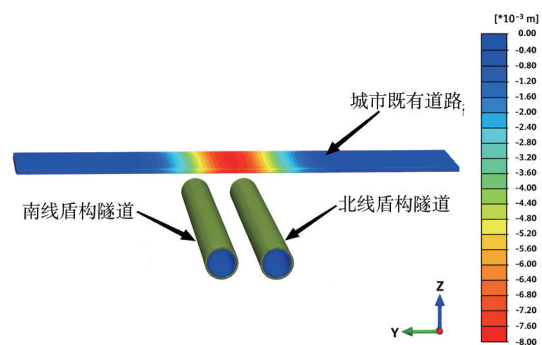
Fig. 15 Change curve of pavement settlement under different shield positions

由图 16 可知,路面结构的竖向沉降最大值均出

现在盾构隧道正上方的路面结构位置处,且当北线施工完成后路面最大沉降值为 -4.645 mm,而南线隧道施工完成后路面最大沉降值为 -7.919 mm。说明双线盾构施工会对既有道路产生二次影响。



(a) 北线盾构施工完成后路面结构沉降云图 (-4.645 mm)



(b) 南线盾构施工完成后路面结构沉降云图 (-7.919 mm)

图 16 盾构施工完成后路面结构沉降云图

Fig. 16 Cloud chart of pavement structure settlement after shield construction

5 结论

以杭州某盾构隧道工程下穿城市既有道路施工为研究背景,结合现场实测对第 345 环至第 403 环施工区间建立三维有限元计算模型进行数值模拟计算分析并为实际工程提供施工意见。分析了盾构开挖上软下硬的复合地层过程中城市既有道路的路面沉降变形规律及力学响应,土体损失率、注浆压力及开挖直径等因素与路面沉降的关系,得出结论如下:

(1) 盾构下穿施工时,路面最大沉降值均出现在南、北隧道中轴线正上方部分,既有道路路面沉降主要发生在盾构机顶推至道路下方过程中且盾构机盾构双线隧道时,路面结构会产生二次沉降。

(2) 注浆压力对城市既有道路的沉降变形有影

响。随着注浆压力的增大，其路面最大沉降随之减小，呈现近似线性关系。路面沉降槽形状几乎没有改变。当注浆压力小于 250 kPa 时，增大注浆压力对路面沉降影响不大，而当注浆压力从 250 kPa 增大到 300 kPa 时，路面最大沉降值相对明显减小。

(3) 开挖直径对城市既有道路的沉降变形有影响。随着开挖直径的增大，其路面最大沉降也随之增大，呈现近似线性关系。开挖直径越小，既有道路结构越稳定，进一步验证了本文数值计算的正确性。当开挖直径小于 10 m 时，开挖直径对路面沉降的影响较小，而当开挖直径大于 10 m 时，曲线曲线整体发生突变。

(4) 提出合理的施工参数。对于本项目建议采用土体损失率为 0.1%，注浆压力为 300 kPa，盾构隧道开挖直径采用为 10 m。此时路面最大沉降值为 7.919 mm，能够满足公路的运营安全要求。

参 考 文 献

- [1] Fang Qian, Du Jianming, Li Jianye, et al. Settlement characteristics of large-diameter shield excavation below existing subway in close vicinity [J]. Journal of Central South University, 2021, 28 (3): 882-897.
- [2] Gao Fei, Li Zhoufeng, Yang Kaiwen, et al. Shield tunneling-induced disturbance in soft soil [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 40.
- [3] 张延杰, 何萌, 宋萌, 等. 富水砂卵石地层力学特性研究 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (6): 1739-1747.
- [4] 李攸宜. 土岩复合地层中盾构隧道施工对地表沉降的影响因素 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2023, 56 (增刊 1): 319-324.
- [5] Hu Yao, Tang Haoran, Xu Yinggang, et al. Ground settlement and tunnel response due to twin-curved shield tunnelling in soft ground with small clear distance [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16 (8): 3122-3135.
- [6] Zeng Linhai, Zhang Daobing, Lian Changjiang, et al. Study on the Influence of an Under-Crossing Parallel Double-Line Shield Tunnel on the Existing Tunnel Structure [J]. Mathematics, 2023, 11 (14):
- [7] Lei Huayang, Shi Liang, Hu Yao, et al. Ground movement and settlement prediction induced by double-track curvature shield tunneling [J]. Acta Geotechnica, 2024, 19 (9): 6179-6193.
- [8] 张婧, 温森, 张国建. 复合地层中盾构施工地表沉降影响因素分析 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2023, 53 (5): 605-614.
- [9] 张家贺, 刘书荣, 刘艳涛, 等. 大直径双孔盾构隧道下穿既有道路沉降预测 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2024, 50 (3): 137-144.
- [10] Krishna S S, Lokhande D R. Study on the effect of surface subsidence due to tunneling under various loading conditions [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 40 (2): 1-21.
- [11] Gong Chenjie, Xie Chaoran, Lin Zanquan, et al. Ground deformation prediction induced by shield tunnelling considering existing multi-story buildings [J]. Journal of Central South University, 2023, 30 (4): 1373-1387.
- [12] 方广涛, 方华昌, 涂怀宇, 等. 砂卵石地层盾构下穿高速公路加固方案研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18 (增刊 2): 841-849.
- [13] Lou Ping, Huang Weixiong, Huang Xinde. Analysis of shield tunnels undercrossing an existing building and tunnel reinforcement measures [J]. Applied Sciences, 2023, 13 (9)
- [14] 李兆宇, 陈铖, 方涛, 等. 富水砂层双线盾构隧道下穿车辆段咽喉区施工参数优化及沉降控制措施 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (12): 16-20.
- [15] 焦欣玥, 董秀竹, 林森斌. 软土地区双线盾构下穿机场跑道沉降规律研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41 (2): 68-73.