

DOI: 10.11779/CJGE20241225

盾构超近距离下穿对既有隧道变形的影响

戴正彬^{1,2}, 卢云龙^{1,2}

(1. 江苏省地质局第一地质大队, 江苏 南京 210041; 2. 江苏南京地质工程勘察院, 江苏 南京 210041)

摘要: 近几年城市建设不断稳步发展, 中国众多城市陆续加大开发建设城市轨道交通项目, 地铁工程建设引起周边地表沉降和构筑物变形时有发生。依托南京某地铁盾构隧道工程, 通过现场监测结合数值模拟方法, 分析了盾构超近距离下穿时对隧道结构产生的影响, 总结盾构施工引起的周边土体变形规律, 为后续工程提供可靠经验。研究结果表明: 分析现场实测值和模拟计算值可知盾构在靠近隧道时地表沉降量较小; 隧道侧墙位移大体水平方向是朝向坑内移动, 同时既有隧道结构的底板竖向位移变化量大于顶板中心轴线上的沉降变化量, 主要取决于盾构掘进具体位置; 盾构近距离下穿过程中对隧道抗拔桩影响显著, 需及时动态调整盾构掘进压力; 最大沉降位于盾构双线中心位置的正上方且为“V”形状。

关键词: 超近距离下穿; 盾构隧道; 数值模拟; 变形监测

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2025)10-2154-09

作者简介: 戴正彬(1976—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质及环境地质等方面的研究工作。

E-mail: 13809044029@163.com。

Influence of ultra-close undercrossing shield on deformation of existing tunnels

DAI Zhengbin^{1,2}, LU Yunlong^{1,2}

(1. The First Geological Brigade of Jiangsu Geology Bureau, Nanjing 210041, China; 2. Jiangsu Nanjing Geo-Engineering Surveying

Institute, Nanjing 210041, China)

Abstract: With continuous development of urban construction in recent years, many Chinese cities have successively developed and increased the construction of urban rail transit projects, and the construction of the metro engineering causes surrounding surface settlements and formation deformations from time to time. Based on a shield tunneling project in Nanjing, the influence of shield tunnelling on the existing tunnel structure is analysed by site monitoring and numerical simulation. The deformation law caused by the surrounding soil of shield construction is summarized, which can provide reliable experience for subsequent projects. The results show that the ground subsidence is small when the shield is near the tunnel by the measured and simulated values. The lateral wall of the tunnel moves toward the pit in the generally horizontal direction, and the vertical displacement variation of the floor of the existing tunnel structure is greater than the settlement variation on the central axis of the roof, which mainly depends on the specific position of the shield tunneling. In the process of shield tunneling, it has a significant influence on the uplift pile of the tunnel, and the driving pressure of shield tunneling should be adjusted dynamically in time. The maximum settlement is located directly above the center of the shield double line and shows a V-shape.

Key words: undercrossing penetration in super short distance; shield tunnel; numerical simulation; deformation monitoring

0 引言

中国城市地铁隧道进入快速发展时期, 地下交通系统愈加发达, 同时也越来越复杂, 盾构隧道下穿既有桥梁桩基或地下隧道等问题愈发普遍。因此, 开展盾构下穿既有隧道研究具有重要的工程价值。

国内外学者通过实际工程案例、理论分析以及数

值模拟等手段对盾构隧道下穿既有隧道进行了研究。马文辉等^[1]以具体工程为背景对盾构下穿既有隧道开展数值模拟分析, 得到盾构施工所引起既有隧道结构变形规律。Liu 等^[2]分析了悉尼地区垂直穿越隧道之间的相互作用, 探讨了喷射混凝土衬砌与锚杆等影响因素, 建议对既有隧道结构做加厚处理, 以提高现有隧

表 1 土层的主要物理力学性质指标
Table 1 Typical physical and mechanical properties of soil layers

名称	层顶标高/m	含水率/%	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	液限/%	塑限/%	塑性指数	液性指数
粉砂	5.5	27.4	19.21	0.724	—	—	—	—
粉土	-1.0	34.3	18.23	0.940	34.0	25.6	8.4	1.11
粉土	-9.5	33.6	18.76	0.924	32.6	23.7	8.9	1.16
淤泥质黏土	-20.5	34.1	17.44	1.052	31.2	18.7	12.5	1.24
粉质黏土	-26.0	26.6	19.60	0.721	32.5	18.2	14.3	0.61

道结构的稳定性。华珊珊^[3]采用两阶段分析法研究了新建盾构隧道上跨与下穿对既有隧道的影响,发现在相同间距条件下,新建盾构隧道下穿既有隧道的影响更加明显。高利宏^[4]分析了盾构双线前后穿越既有隧道的变形规律及周边土体稳定性,结果表明,既有隧道结构竖向变形的变化过程与施工进度具有对应关系。魏纲等^[5]结合工程案例,研究了盾构下穿前后既有隧道的环向围压、弯矩、轴力及剪力的变化,并推导出隧道环向围压公式。韩冠楠^[6]针对砂卵石地层新建隧道如何顺利下穿运营地铁的问题,分析了不同夹层土土层参数对下穿施工所产生的影响。金大龙等^[7]通过离心模型试验及数值模拟,分析了小净距隧道群施工对周围土体应力影响规律,揭示了盾构多次近距离穿越施工引起既有隧道的变形及受力变化机理。杨林松等^[8]对大直径盾构下穿铁路工程进行的离心机模型试验发现,盾构掘进时对铁路影响大致位于下穿前后 25 m 范围内,且下穿完成后所产生的铁路路基沉降占总沉降的 64%,远大于下穿前的沉降量。

目前,盾构下穿既有隧道的工程实践和研究方面已有一定的成果。但是,针对盾构超近距离(小于 1 m)下穿既有隧道的相关报道和研究工作仍然较少。盾构近距离下穿既有隧道时,可能会对既有隧道的结构稳定性产生一定影响,需要进行隧道结构稳定性评估,以确保盾构施工不会对既有隧道的结构安全造成威胁。因此,开展复杂的施工环境下盾构超近距离下穿既有隧道研究具有重要工程意义。本文依托南京某地铁盾构下穿工程,采用现场监测以及数值模拟的手段开展盾构超近距离下穿对既有隧道的影响研究,通过分析地表沉降,既有隧道侧墙位移和底板变形以及隧道抗拔桩水平位移等物理量,阐明盾构超近距离下穿对既有隧道结构的变形影响,为以后的工程提供有力的证据。

1 工程概况

本工程位于南京某地铁两站盾构区间,既有隧道为双向六车道单箱双室折板拱形框架结构,隧道结构

宽度 28 m,顶板埋深 2.5 m,盾构顶端埋深 10.6 m,两地铁站端头井间距约为 17.6 m。区间盾构与上层既有隧道相对位置关系如图 1 所示。下穿段盾构拱顶与既有隧道结构底净距约为 1.0 m,与既有隧道抗拔桩横向净距为 0.5 m,属超近接施工。

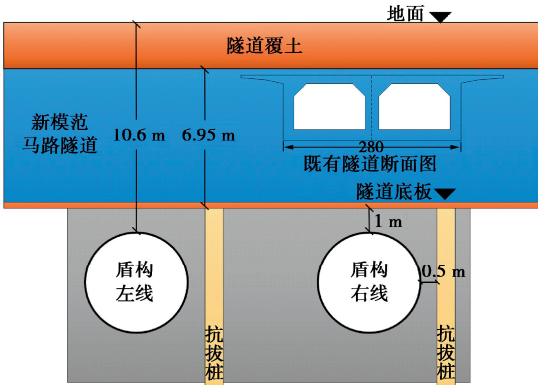


图 1 盾构与既有隧道位置关系图

Fig. 1 Position relationship between shield tunneling and existing tunnels

拟建车站场地位于南京漫滩区,场地高程为 10.51~11.54 m(吴淞高程系)。该区域砂土、粉土及软土较丰富,上部普遍覆盖新近沉积粉砂及黏性土,基岩埋深变化较大,各土层物理指标如表 1 所示。

2 盾构超近距离下穿既有隧道现场监测分析

盾构掘进施工是一个动态过程,具有典型的时空效应,其对周边环境的影响存在多种较为复杂的因素。按照传统理论难以预测施工过程中可能产生的工程问题。现场监测是探究盾构近距离下穿对既有隧道影响的有力手段,可动态诠释既有隧道受力变形响应。

2.1 盾构掘进产生的地表沉降

盾构在掘进过程中对周边土体扰动十分明显。为分析地表沉降情况,3 个断面地表监测点布置如图 2 所示。本文研究中盾构左线尚未始发,仅盾构右线自南向北掘进穿越既有隧道,故以下将针对盾构右线现场实测数据进行分析。

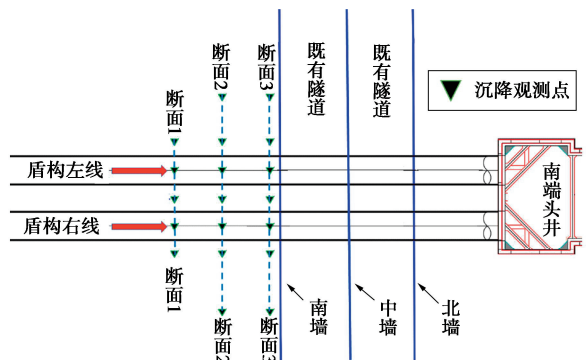
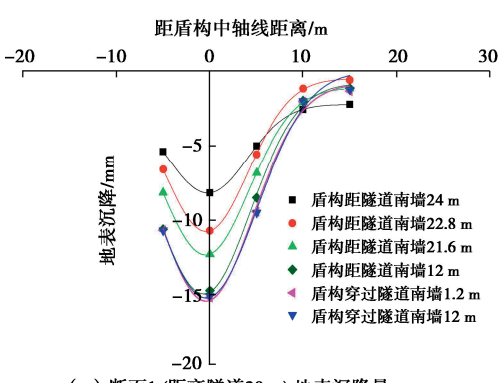


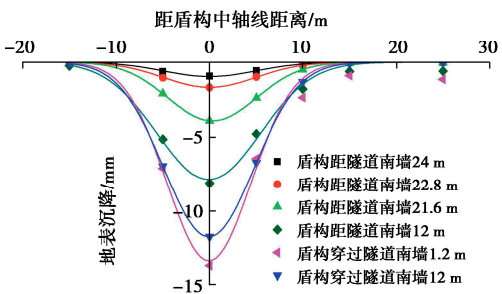
图 2 隧道上部地表沉降监测点布置

Fig. 2 Layout of ground settlement monitoring points in upper tunnel

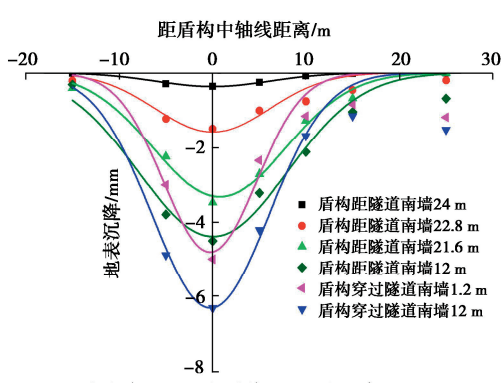
图 3 为 3 个断面的地表沉降曲线与盾构掘进进程关系。由图 3 可知，盾构朝既有隧道掘进过程中，地表出现明显的下沉现象，地表最大沉降量达到 15.19 mm。盾构隧道施工时，在盾构掌子面前端土体发生一定程度的超前沉降，即盾构未到目标位置时土体已经开始沉降，并且随着盾构掘进持续下沉，在盾尾穿过目标位置后地表沉降逐渐趋于稳定。盾构上方地表发生最大沉降位置处于盾构的正上方即盾构中轴线上方，而在距离盾构中轴线约 10~15 m 位置处地表沉降较小。对比 3 个断面的地表沉降可知，由于既有隧道侧墙与盾构掘进土体距离较近，隧道侧墙对周边土体存在一定的约束作用，靠近既有隧道的断面 3 地表沉降最大值仅为断面 1 和断面 2 位置地表沉降最大值的 1/3。沉降量仍未超过控制限值 30 mm。



(a) 断面1 (距离隧道20 m) 地表沉降量



(b) 断面2 (距离隧道10 m) 地表沉降量



(c) 断面3 (距离隧道2 m) 地表沉降量

图 3 地表沉降与盾构掘进进程关系

Fig. 3 Relationship between surface settlement and shield tunneling process

此外，可采用 Gauss 公式对隧道施工引起的地表沉降槽进行拟合：

$$S = S_{\max} \cdot \exp \left[-\frac{(x - x_c)^2}{2i^2} \right] \quad (1)$$

式中： S 为地表沉降量 (mm)； i 为地表沉降槽宽度系数，定义为沉降槽中心与沉降曲线拐点位置水平距离 (m)； S_{\max} 为地表最大沉降量 (mm)； x 为目标点距隧道中心线距离 (m)； x_c 为曲线中心偏移量 (m)。

根据 Gauss 公式拟合统计断面 1~3 在盾构穿过目标断面后现场监测数据，得出断面 1 实际沉降槽宽度系数 $i=5.1$ m，断面 2 与断面 3 的系数 i 分别为 4.9，6.2 m。表 2 给出了由前人的经验公式计算得到的沉降槽宽度系数 i ，并与实测数据进行对比分析。Peck^[9] 提出的经验公式地表沉降槽宽度系数 $i=5.8 \sim 6.8$ m，略大于超近距离下穿既有隧道所产生的实际沉降槽宽度系数；刘建航^[10]提出的公式计算得 $i=9.22$ m，大于现场监测数据拟合得到的 i ；由 Attewell 等^[11]经验公式可知，不同的土质和地下水条件计算得出 i 均不一样；O'Reilly 等^[12]经验公式计算得到沉降槽宽度系数 i 与盾构埋深及土质条件有关，接近本研究中的实际沉降槽宽度系数，可为实际工程提供参考。

查阅区间盾构勘察资料得知盾构下穿隧道区域为粉土（土性介于砂与黏性土之间），以断面 1（距离既有隧道较远）为例，监测数据计算得出的 $i=5.1$ m。由此发现 Attewell 等^[11]、O'Reilly 等^[12]、Atkinson 等^[13]提出的经验公式可对单一土层情况下盾构施工引起地表沉降进行合理预测。然而，对于地质条件复杂的实际工程，却很难预测。因此需对具体工程对症分析，并借助经验公式等辅助手段提高盾构掘进安全性。

2.2 既有隧道结构竖向位移

隧道南墙、中墙和北墙位置监测点位见图 4。SD03、SD12 及 SD30 测点分别位于隧道南墙、中墙、

北墙, 相邻间距为 14 m。

表 2 经验公式计算得到的沉降槽宽度系数

Table 2 Settling trough width coefficient calculated by empirical formulas	
学者	计算得到沉降槽宽度系数 i
Peck ^[9]	$i=5.8\sim6.8$ m (系数 $n=0.8\sim1.0$)
Attewell 等 ^[11]	$i=6.8$ m (黏土); $i=3.44$ m (砂土, 地下水位以上); $i=4.66$ m (砂土, 地下水位以); $i=4.18$ m (不考虑地下水)
	$i=6.95$ m (黏土 $3\text{ m}\leq z\leq 34\text{ m}$); $i=3.7$ m (粒状土 $6\text{ m}\leq z\leq 10\text{ m}$); $i=2.72\sim4.08$ m (砂土); $i=9.52$ m (软黏土); $i=6.8$ m (中等黏土); $i=5.44$ m (硬黏土)
	$i=9.22$ m (土体内摩擦角根据地勘报告中直剪试验取 29°)
O'Reilly 等 ^[12]	$i=4.2$ m (松砂); $i=5.5$ m (密实和超固结土)
刘建航 ^[10]	
Atkinson 等 ^[13]	

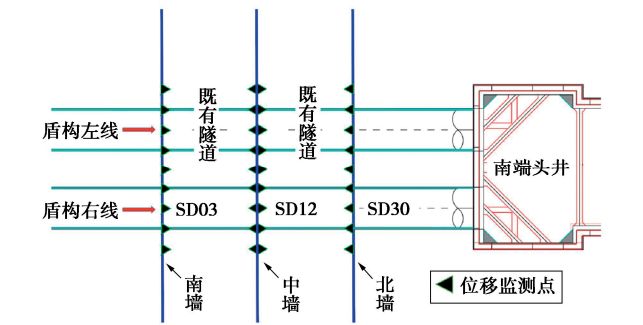


图 4 隧道结构位移监测点布置

Fig. 4 Layout of tunnel structure displacement monitoring points

盾构掘进进程与隧道各断面竖向位移关系如图 5 所示。盾构距离既有隧道 1.2 m 时, 由于盾构掌子面土压力作用, 使得既有隧道南墙底部隆起, 而 SD30 测点即隧道北墙沉降约为 0.2 mm。当盾构穿过隧道南墙, 南墙结构逐渐下沉, 中墙和北墙逐渐隆起。当掌子面穿过既有隧道南墙 21.6 m 时, 隧道北墙尚有隆起, 待盾构穿越盾构后 (穿过北墙 6.8 m) 发生下沉; 当盾构整体完全穿越隧道后, 隧道结构的最终变形是北墙下沉, 而隧道南墙和中墙处于隆起状态, 分析原因可能是由于盾构与既有隧道距离较近, 当盾构在隧道南墙位置时, 隧道整体发生变形以中墙抗拔桩为支点发生南墙隆起、北墙下沉现象, 而随着盾构继续前进, 既有隧道整体受土体变形影响使得隧道整体发生轻微上浮。

2.3 隧道结构水平位移

盾构右线正上方 3 个断面测点水平位移见图 6, 正值表示水平位移与盾构掘进方向相同 (由南向北朝

向基坑方向)。

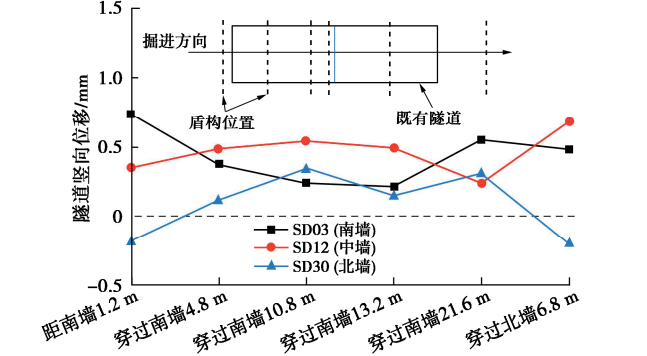


图 5 盾构下穿时隧道侧墙竖向位移量
Fig. 5 Vertical displacements of tunnel sidewall during shield undercrossing

由图 6 可见, 3 个测点处隧道结构水平位移随盾构掘进变化趋势基本一致。盾构开始穿越至完成穿越, 整个隧道发生的水平位移方向与盾构掘进方向相同, 均朝向端头井基坑方向。在盾构处于距离隧道南端 1.2 m 时, 既有隧道结构变形最大位置为隧道南墙附近, 表明盾构掌子面推进对前方土体和隧道结构的挤压效应较为显著。盾构掘进至中墙附近时水平位移达到最大值, 随后隧道侧墙结构水平方向变形趋缓。既有隧道水平位移从南至北逐步减小, 可见盾构掘进对最先穿越的南墙产生的影响最大。

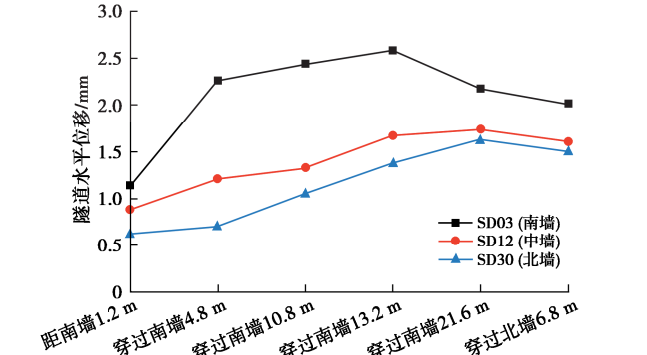


图 6 盾构下穿时隧道侧墙水平位移量
Fig. 6 Horizontal displacements of tunnel sidewall during shield undercrossing

3 盾构下穿隧道计算模型建立

3.1 模型尺寸

一般认为, 盾构施工仅影响其 3 倍直径范围内的土层应力。因此, 将本文模型的边界范围取盾构直径 3 倍左右。根据现场实际隧道及其抗拔桩位置等概况, 有限元模型尺寸设置为 74.4 m×75 m×50 m。

本文盾构隧道模型总长 74.4 m, 盾构每环长度 1.2 m, 单线共计 62 环,, 管片厚度 0.35 m。盾构 24 环处于既有隧道南墙底部, 48 环处于既有隧道北墙底部, 盾构切口环直径 6.34 m, 盾构内径 5.4 m。既有公路

隧道长 75 m，隧道侧墙下方设有 3 排抗拔桩，每排抗拔桩间距约 12.5 m，桩长为 28 m，桩径 0.8 m，盾构隧道与既有隧道位置正交。盾构下穿既有公路隧道模型见图 7，8。

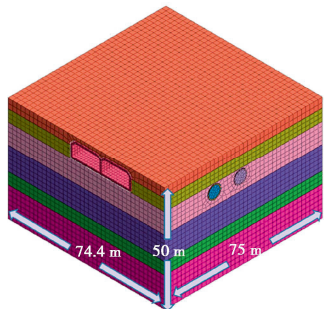


图 7 盾构下穿隧道模型

Fig. 7 Model of shield undercrossing existing tunnel

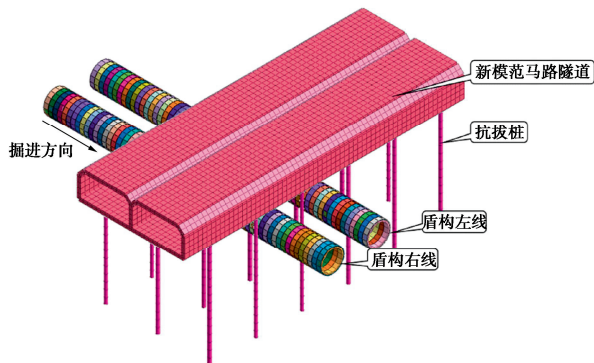


图 8 盾构与既有隧道位置关系

Fig. 8 Position relationship between shield and existing tunnels

3.2 模型边界条件与模型参数

在模型底部（Z 向）设位移约束，模型四周（X 向与 Y 向）同样设置位移约束，顶部（Z 向）为自由边界。土体采用修正莫尔-库仑本构模型。盾构下穿既有隧道地层参数见表 3。拼接管片选用 C50 混凝土预制厚度 0.35 m 管片，盾构施工过程总尾部同步注浆体弹性模量选取浆液 1 d 冷却后的强度模量。管片与注浆体均采用实体单元模拟，盾壳与既有隧道结构采用板单元，抗拔桩采用梁单元。具体参数见表 4。

表 3 土层参数

Table 3 Soil parameters

土层名称	泊松比 ν	内摩擦角/ $(^\circ)$	黏聚力 $c/$ kPa	重度 $\gamma/$ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	层厚/ m
杂填土	0.33	25.0	5.0	22.0	4.5	2.5
素填土	0.38	10.0	10.0	18.5	5.0	2.0
粉砂	0.31	34.5	6.1	19.2	33.7	6.5
稍密性粉土	0.33	28.5	12.4	18.4	22.4	8.5
中密性粉土	0.30	25.1	16.6	18.2	18.3	11.0
淤泥质粉质黏土	0.38	22.3	15.3	17.4	12.9	5.5
粉质黏土	0.30	14.5	32.8	19.5	21.4	14.0

表 4 盾构及既有结构参数

Table 4 Parameters of shield and existing structure

结构名称	材料类型	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/$ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	单元类型
盾壳	钢	210000	0.25	78	2D 板单元
管片	C50 混凝土	35000	0.25	25	3D 实体
注浆体	—	150	0.30	23	3D 实体
隧道结构	C35 混凝土	31500	0.20	25	2D 板单元
隧道抗拔桩	C35 混凝土	31500	0.20	25	1D 梁单元

在盾构掘进状态下，理想情况应是土仓压力与掌子面前方土压力一致，进而降低掘进对周围岩体扰动。数值模拟可将掌子面掘进压力近似成土压力，根据盾构右线掘进记录日报信息，盾构土压力取值约 0.2 MPa，盾构掘进时将对应土仓压力激活。

模型盾构右线先掘进，并每掘进 2 环作为一施工工序，即每一阶段掘进 2.4 m。模拟盾构掘进的具体施工步骤见表 5。

表 5 盾构施工工序

Table 5 Shield construction process

施工步骤	建模内容
工序 1	激活所有土体和隧道结构，初始地应力计算，位移清零
工序 2	盾构右线激活 1~2 环土体，激活 1~2 环盾壳，激活第 1 个掘进压力
工序 3	激活 3~4 环土体，激活 3~4 环盾壳，激活管片 1~2 环，钝化 1~2 环盾壳，激活第 2 个掘进压力
工序 4	激活 5~6 环土体，激活 5~6 环盾壳，激活管片 3~4 环，激活注浆 1~2 环，钝化 3~4 环盾壳，激活第 3 个掘进压力
.....
工序 33	激活 61~62 环土体，激活管片 59~60 环，激活注浆 57~58 环，钝化 59~60 环盾壳
工序 34	激活管片 61~62 环，激活注浆 59~62 环，钝化 61~62 环盾壳，盾构右线完成

4 盾构右线下穿隧道模拟结果分析

4.1 地表沉降

盾构掘进过程中，盾构上方土体产生明显竖向变形，盾构掘进至不同位置处土体竖向位移云图见图 9。由于开挖卸载，盾构隧道底部土体发生隆起，隆起最大值约为 37 mm。由于施工造成的周围土体扰动、地

层损失、以及剪切破坏等因素, 盾构顶部土体发生沉降, 沉降最大值约为 28 mm。

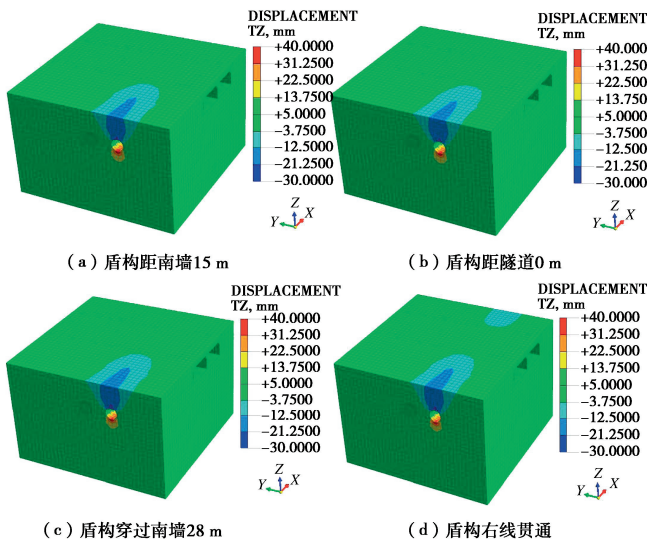


图 9 土体竖向位移云图

Fig. 9 Nephogram of soil vertical displacements

盾构右线施工完成后 3 个断面现场实测值与数值模拟结果对比如图 10 所示。

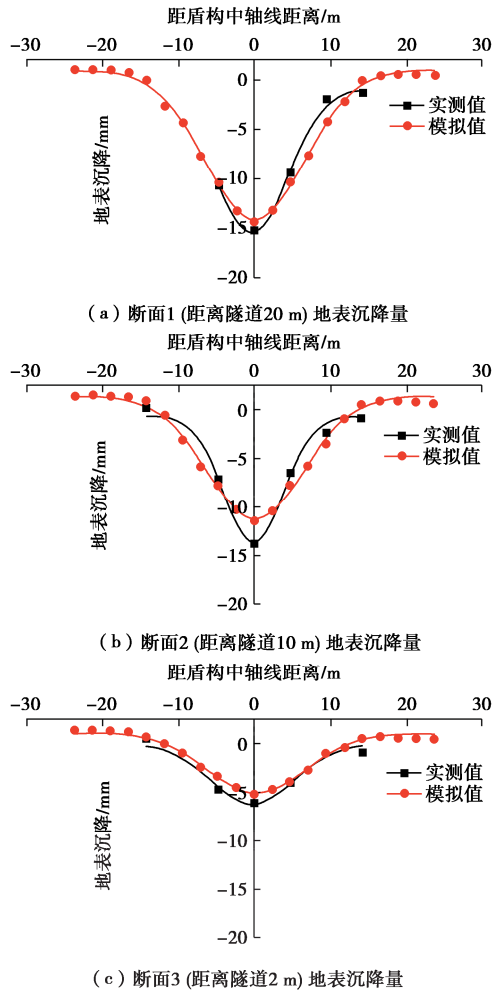


图 10 土体变形实测结果与数值模拟结果对比

Fig. 10 Comparison of measured soil deformation with that of numerical simulation

由图 10 可知,地表沉降的横向沉降槽数值模拟计算结果和实测结果规律一致。断面 3 位置处(靠近隧道南侧结构)最终沉降量小于断面 1 和断面 2 处的沉降量。

此外,根据式(1)拟合得到模拟沉降槽宽度系数 i 约为 5.5 m(断面 1),监测数据拟合得出 i 约为 5.1 m,二者大小相近。此外,根据工程经验当横向范围超过 $\sqrt{3}i$ (最大曲率位置),地表沉降变化减缓,本文横向范围约为 9.5 m。

4.2 既有隧道侧墙结构位移

隧道竖向位移云图如图 11 所示。隧道结构最大位移位于隧道南侧底板,这是因为隧道侧墙结构比底板处稳定,并且隧道底板位置受盾构前方土体影响后使得底板产生拉压变形,从而产生隆起现象。盾构中轴线上方隧道南墙竖向、水平位移实测值(SD03)与模拟计算值对比情况详见图 12。

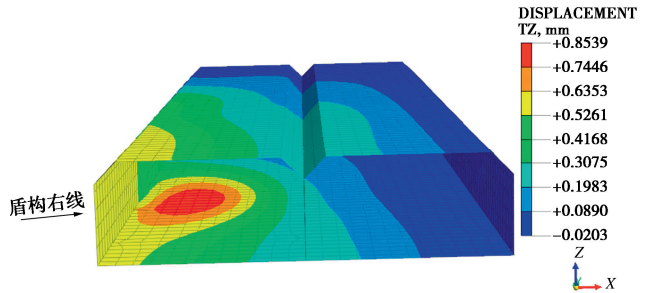


图 11 盾构穿越前隧道竖向位移

Fig. 11 Vertical displacement contour of shield tunnel before crossing

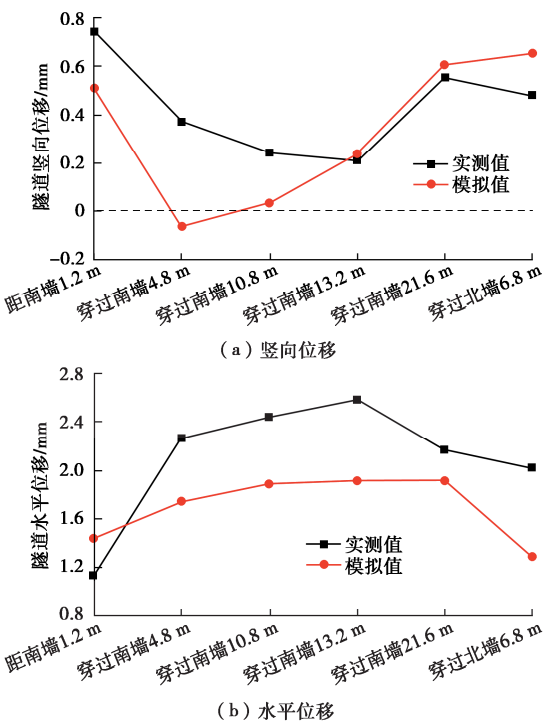


图 12 隧道侧墙位移

Fig. 12 Displacements of tunnel sidewall

数值模拟与现场监测得到既有隧道的变形趋势基本一致,即盾构距离既有隧道一定距离时,隧道已产生隆起变形,同时隧道南墙水平方向受盾构施工影响向坑内(掘进方向)变形。当盾构穿过既有隧道南墙约 4.8 m 时,隧道南墙隆起变形有所下降。此后随着盾构继续掘进,南墙竖向变形最终趋于稳定。在盾构下穿既有隧道过程中南墙结构产生的变形是非常之小,处于安全设计限值内。

4.3 既有隧道底板变形

为探究盾构中轴线上方隧道底板的变形情况,对盾构在隧道下方不同位置时隧道底板变形情况进行分析。图 13 为盾构掘进至隧道中墙和隧道北墙时隧道底板竖向变形云图。图 14 为隧道底板最大竖向位移。

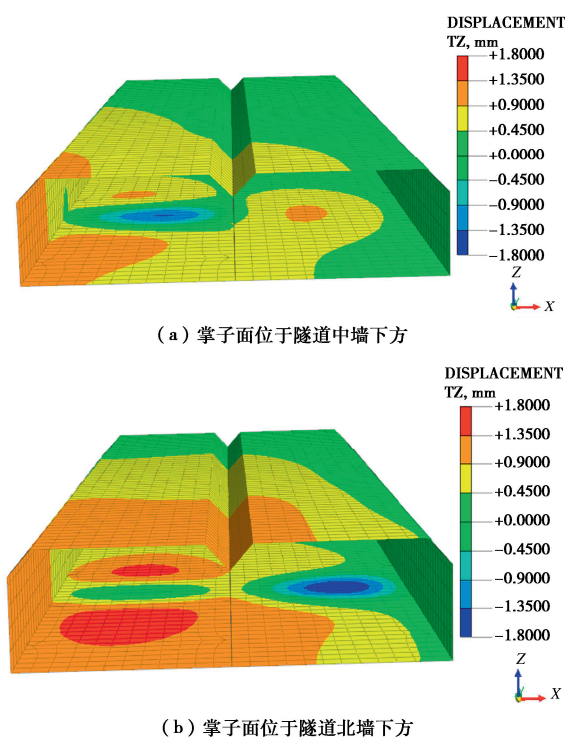


图 13 隧道底板竖向位移

Fig. 13 Vertical displacement contour of tunnel bottom plate

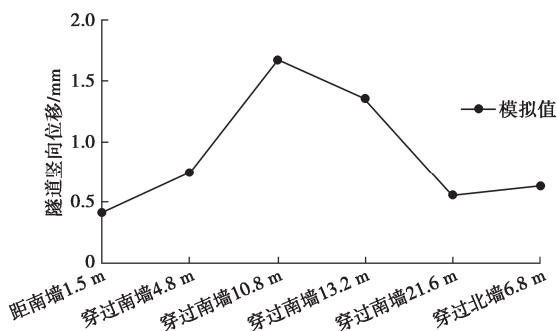


图 14 隧道底板最大竖向位移

Fig. 14 Maximum vertical displacements of tunnel bottom plate

盾构掌子面前方 5~6 m 处隧道底板变形最大,最大隆起量为 1.68 mm。盾构掘进导致其正上方隧道底板发生沉降。由于隧道抗拔桩支撑作用,盾构两侧上方既有隧道底板出现隆起变形。

当盾构掘进至隧道北墙位置,在盾构管片、注浆等施工后隧道南侧底板出现隆起变形。以上结果表明在盾构穿越前及穿越过程中均应适当降低土压力,进而较少盾构施工所引起隧道底板的隆起量。此外,在盾构穿过的区域应及时拼接管片,并选用合理的注浆压力进行盾尾注浆,从而降低盾构穿越后隧道底板变形。穿越过程中做好实时监测,观测隧道底板是否有裂缝的产生。

4.4 隧道抗拔桩水平位移

盾构下穿既有隧道时,隧道底部抗拔桩对约束既有隧道变形起到了重要作用。选取靠近盾构右线 0.5 m 处的 3 根抗拔桩进行分析。为便于描述,如图 15 所示,将 3 根桩由南至北分为编为 KBZ01~KBZ03。

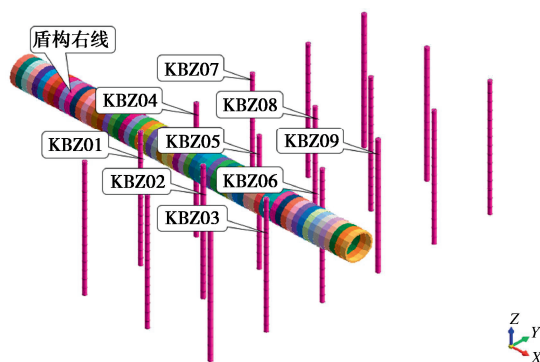
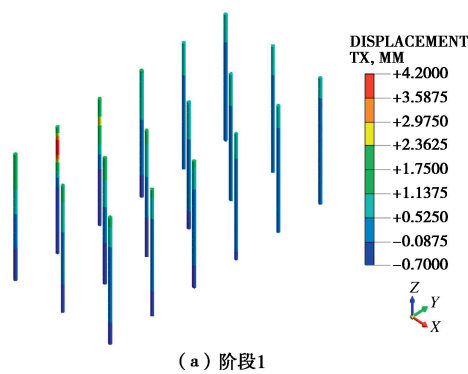


图 15 抗拔桩与盾构位置关系

Fig. 15 Relationship between uplift pile and shield position

将盾构下穿过程分为 5 个阶段,即盾构处于隧道南墙位置为阶段 1,处于南板位置为阶段 2,处于中墙位置为阶段 3,处于北板位置为阶段 4,处于北墙位置为阶段 5。盾构各阶段抗拔桩 X 向(沿盾构掘进方向)位移云图见图 16。



(a) 阶段1

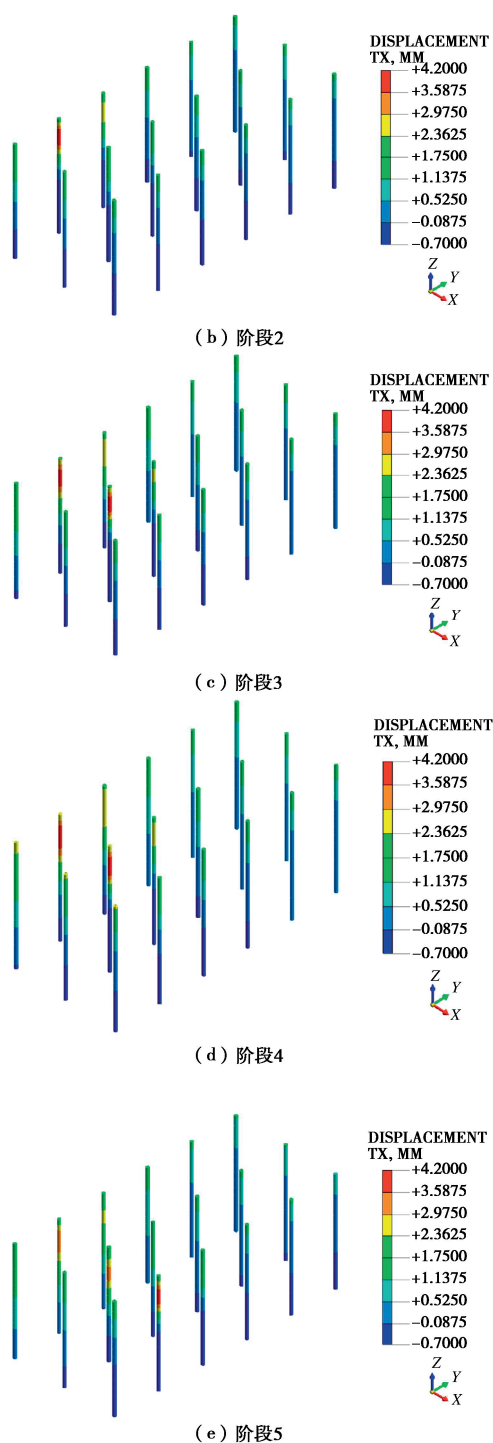
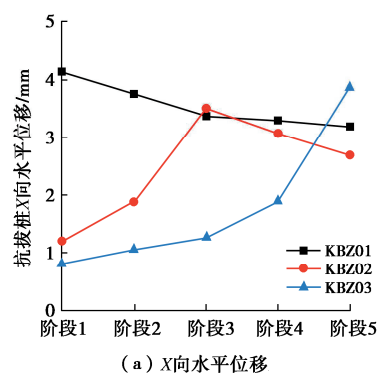


图 16 抗拔桩 X 向水平位移云图

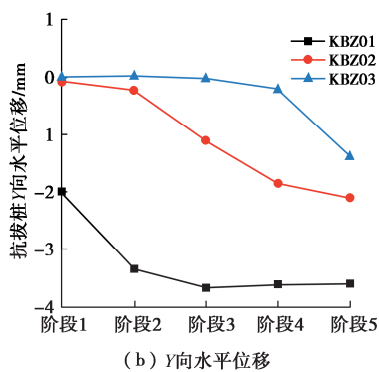
Fig. 16 Horizontal displacement nephogram of uplift pile in X-direction

由于盾构掘进对桩体的侧向作用, 最大桩体侧向位移出现在第 1 阶段, 编号为 KBZ01, 位移量为 4.12 mm。此外, 第 3 阶段时 KBZ02 以及第 5 阶段时 KBZ03 均受到盾构掘进的影响, 发生明显的侧向位移。当着盾构穿越后, 桩体 X 向位移逐渐恢复。

图 17 为桩 KBZ01~KBZ03 在各个阶段水平位移。



(a) X 向水平位移



(b) Y 向水平位移

图 17 抗拔桩水平位移

Fig. 17 Horizontal displacements of uplift pile

5 结 论

本文根据实际工程对盾构超近距离下穿既有隧道进行数值模拟, 对盾构右线施工引起的地表沉降、既有隧道侧墙、底板以及隧道下部抗拔桩变形展开研究, 主要得到以下 3 点结论。

(1) 盾构右线在掘进过程中现场实测值与模拟计算值大小和趋势基本一致, 可知盾构在靠近隧道时地表沉降量较小, 横向距离超过盾构中轴线 9.5 m 后地表沉降量逐渐减小。

(2) 盾构在穿越隧道过程中既有隧道侧墙变形实测值与模拟值基本相近, 隧道侧墙位移大体水平方向都是朝向坑内方向移动, 竖向则为隆起; 模拟计算后发现超近距离下穿既有隧道时, 隧道底板受盾构施工影响比隧道侧墙甚为敏感, 即在盾构下穿各个阶段底板所产生的变形均不一样, 表现为随盾构进程产生不同程度的隆起和下沉现象。

(3) 通过模拟计算发现: 抗拔桩作为稳固既有隧道的主要措施起到了至关重要的作用, 盾构右线右侧的抗拔桩产生沿盾构斜方向 (与盾构掘进方向夹角约 45°) 移动, 且在 X 向抗拔桩变形会有一定恢复现象, Y 向由于坚固的衬砌结构则不会有此现象, 即 Y 向变形后位移量基本趋于稳定。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 戴正彬和卢云龙设计研究内容, 戴正彬提供研究指导, 卢云龙完成计算分析, 戴正彬和卢云龙参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。This study was designed by DAI Zhengbin and LU Yunlong and supervised by DAI Zhengbin. The numerical analyses were conducted by LU Yunlong. The manuscript was drafted and revised by DAI Zhengbin and LU Yunlong. All the authors have read the last version of manuscript and consented for submission.

参考文献:

- [1] 马文辉, 彭 华, 杨成永. 盾构近距下穿既有地铁盾构隧道施工参数控制[J]. 西南交通大学学报, 2018, **53**(1): 119-127. (MA Wenhui, PENG Hua, YANG Chengyong. Construction parameters control of shield tunnel underneath traversing existing dual shield tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, **53**(1): 119-127. (in Chinese))
- [2] LIU H Y, SMALL J C, CARTER J P, et al. Effects of tunnelling on existing support systems of perpendicularly crossing tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(5): 880-894.
- [3] 华珊珊. 新建隧道上跨或下穿施工对既有隧道力学响应研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018. (HUA Shanshan. Study on the Mechanical Response of Above-Crossing or under-Crossing Tunnelling on the Existing Tunnel[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018. (in Chinese))
- [4] 高利宏. 双线盾构隧道近接下穿既有隧道结构沉降变形与施工节点控制分析[J]. 现代隧道技术, 2021, **58**(4): 194-202. (GAO Lihong. Analysis of settlement deformation and construction node control of a double-line shield tunnelling passing under existing tunnel in close distance[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, **58**(4): 194-202. (in Chinese))
- [5] 魏 纲, 齐永洁, 吴华君, 等. 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): 3515-3527. (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): 3515-3527. (in Chinese))
- [6] 韩冠楠. 砂卵石地层大断面平顶直墙隧道下穿运营地铁变形控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019. (HAN Gannan. Research on Deformation Control of Large-Section Flat-Topped Straight-Wall Tunnel Underneath the Operating Subway in Sandy Cobble Stratum[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese))
- [7] 金大龙, 袁大军, 韦家昕, 等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(8): 1507-1514. (JIN Dalong, YUAN Dajun, WEI Jiaxin, et al. Centrifugal model test of group tunneling with small spacing beneath existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(8): 1507-1514. (in Chinese))
- [8] 杨林松, 刘继国, 舒 恒, 等. 超大直径盾构隧道下穿铁路施工的离心机模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2021, **58**(4): 170-177, 184. (YANG Linsong, LIU Jiguo, SHU Heng, et al. Centrifugal model test on construction process of a super large diameter shield tunnel passing under existing railway[J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, **58**(4): 170-177, 184. (in Chinese))
- [9] PECK R B. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground[C]// Proc of 7Th Icsmf, Mexico, 1969.
- [10] 刘建航. 地下墙深基坑周围地层移动的预测和治理之二——基坑周围地层移动的预测[J]. 地下工程与隧道, 1993(2): 2-15, 23. (LIU Jianhang. Prediction and control of stratum movement around deep foundation pits with underground walls-part two: prediction of stratum movement around foundation pits[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1993(2): 2-15, 23. (in Chinese))
- [11] ATTEWELL P B, YEATES J, SELBY A R. Soil Movements Induced by Tunnelling and Their Effects on Pipelines and Structures[M]. New York: United States: Methuen, Inc., 1986.
- [12] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements Above Tunnels in the United Kingdom-Their Magnitude and Prediction[M]. Settlements Above Tunnels in the United Kingdom-Their Magnitude and Prediction, United Kingdom: Institution of Mining and Metallurgy, 1982.
- [13] ATKINSON J H, POTTS D M. Subsidence above shallow tunnels in soft ground[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, **103**(4): 307-325.