

复合地层盾构穿越构筑物群扰动规律 及桩基隔断效应分析

王秋实^{1,2}, 丁文其^{1,2}, 乔亚飞^{1,2}, 刘厚朴³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 依托某盾构穿越工程, 建立了盾构同时穿越桩基和多条隧道的数值模型并进行了验证。总结了盾构穿越诱发的地表沉降、既有隧道收敛和桩基变形规律, 探明了既有桩基对扰动传递的隔断效应, 并通过土体应力路径分析揭示了桩-土-隧相互作用机制。结果表明: 桩基的存在减小了隧道施工引起的地表沉降和沉降槽宽度, 改变了既有隧道的变形模式, 对扰动传递具有明显的隔断效应; 受既有隧道和盾构施工的双重影响, 两者间桩基承台的横向倾斜出现多个变形阶段, 桩身上部出现较大的横向位移, 而桩底位移较小; 桩基、隧道和土体的刚度差异是桩-土-隧间复杂相互作用的根本原因。

关键词: 盾构穿越; 复合地层; 桩基; 隔断效应; 数值模拟

中图分类号: U94⁺¹

文献标志码: A

Analysis on Disturbance Law and Pile Barrier Effect of Shield Crossing Underground Structures in Composite Strata

WANG Qiushi^{1,2}, DING Wenqi^{1,2}, QIAO Yafei^{1,2}, LIU Houpu³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Based on a shield tunnel project that simultaneously crosses multiple piles and existing tunnels, a numerical model was built and verified. The laws of surface settlement, convergence of existing tunnels and pile deformation induced by shield tunneling were summarized via the simulation. In addition, the

barrier effect of piles on the transmission of disturbance was highlighted. The pile-soil-tunnel interaction mechanism was also revealed with the analysis of stress path of soils. The results show that the existence of pile foundation reduces the surface settlement and the width of settlement trough induced by shield tunneling, and changes the deformation mode of the existing tunnels. All these differences indicate that the pile has obvious barrier effect on the transmission of disturbance. A large lateral displacement occurs at the top part of piles and the lateral inclination of the pile cap undergoes complex trends, which is the results of the existing tunnel and shield tunneling process. The stiffness difference among piles, tunnels and soils is the basic reason for pile-soil-tunnel interactions.

Key words: shield-crossing; composite strata; piles; barrier effect; numerical simulation

城市地下交通网不断密集, 新建隧道常常不可避免地穿越既有隧道、桩基等地下建(构)筑物, 盾构穿越施工已成为我国地铁建设的新常态^[1]。随着城市中心地下构筑物密度的增大, 盾构穿越呈现了由单体穿越向复杂构筑物群穿越的发展趋势。盾构穿越扰动是盾构施工-土-既有构筑物相互作用的结果, 既有构筑物的结构形式和刚度对其影响较大, 尤其是存在构筑物群时, 其相互作用机制十分复杂, 呈现隔断、放大等效应, 增大了施工风险和挑战。

盾构隧道施工会改变土体的应力状态, 引发土体变形, 并经土体传递导致桩基、既有隧道等临近构筑物

收稿日期: 2022-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(52090083); 中铁南方 2021 年度科技创新计划(ZTNF-2021-05)

第一作者: 王秋实(1999—), 男, 博士生, 主要研究方向为隧道工程力学与扰动控制。

E-mail: 2011129@tongji.edu.cn

通信作者: 乔亚飞(1990—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为地下工程施工力学与扰动控制。

E-mail: yafei.qiao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

变形^[24]。通过试验、数值模拟和实测数据分析等手段,国内外学者对盾构穿越地下构筑物的扰动规律和机制进行了研究。在盾构穿越既有桩基方面,Hergarden等^[5]与Chen等^[6]分析了隧道形状、土体强度、穿越净距、桩基尺寸等因素对盾构穿越诱发桩基变形规律的影响。奚晓广等^[2]通过数值模拟详细讨论了盾构穿越高架桥桩时桩基与承台的变形规律。史渊等^[7]、江帅等^[8]通过数值模拟评估了加固桩对穿越诱发桩基变形的改善作用。

在盾构穿越既有隧道方面,何川等^[9]通过数值模拟阐述了重叠下穿引起既有隧道的纵向变形规律,汪洋等^[10]通过模型试验和数值模拟分析了正交下穿时既有隧道衬砌的变形与内力变化。张琼方等^[11]通过监测数据分析探究了盾构小角度下穿引起既有隧道的变形规律,金大龙^[12]则分析了重叠或正交下穿既有隧道时土体与既有隧道的相互作用规律,并按照穿越位置关系和穿越角度对盾构穿越既有隧道工程进行了系统分类。

上述研究多聚焦于单一类型构筑物的穿越,鲜有探讨穿越复杂构筑物群的扰动规律,然而既有城市地铁建设出现了大量穿越复杂构筑物群的需求,因此亟需针对盾构穿越桩基、隧道等复杂构筑物群的扰动规律开展研究,分析不同既有构筑物的相互作用,揭示盾构穿越复杂构筑物群的扰动规律,尤其是既有构筑物对扰动传递的隔断作用和盾构施工-

土-复杂既有结构的相互作用机制。

本研究依托深圳市地铁 11 号线二期工程某盾构区间工程,建立并验证了盾构穿越复杂构筑物群的数值模型,总结了盾构隧道同时穿越桩基和多条既有线的扰动规律,并重点讨论了桩基对扰动传递的隔断效应,以及桩-土-隧之间的相互作用机制。

1 工程概况

深圳市 11 号线二期工程某盾构区间右线埋深 21.96 m,采用外径为 6.48 m 的土压平衡盾构施工。C50 混凝土管片的外径为 6.0 m,壁厚为 0.35 m,标准环宽为 1.5 m,并采用错缝拼装。在某穿越节点,新建隧道穿越复杂的地下构筑物群,在隧道轴线 60 m 范围内存在 5 个桩基础和 5 条既有隧道,具体穿越位置关系如图 1 所示。新建隧道位于 5、6 号桩基础之间,与 5、6 号桩基础的净距分别为 3.96 m 和 9.60 m。既有 2 号线隧道外径 6.0 m,分别位于 6 号桩基础两侧,其中 2 号线右线与新建隧道同位于 5、6 号桩基础之间,净距 6.16 m。既有 14 号线隧道外径 6.2 m,分别位于 4 号桩基础两侧。3 号、4 号、5 号、6 号桩基础各由 4 根灌注桩组成,7 号桩基础由 9 根灌注桩组成;桩基均为端承桩,桩间距 6.6 m,桩径 1.2 m;桩基础承台间距 15.3~20.5 m。

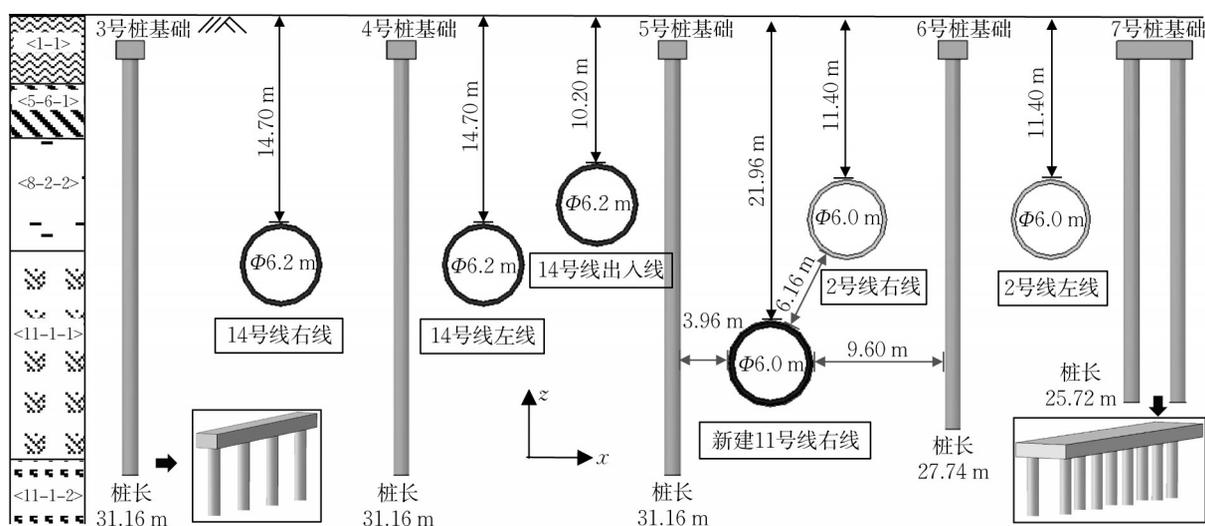


图 1 新建隧道与既有桩基和隧道的位置关系

Fig.1 Profile of new-built tunnel and existing underground structures

工程场地从上至下共有 7 个地层(部分地层见图 1),其物理力学参数如表 1 所示。上部的素填土、中砂、砾质黏性土与下部风化花岗岩的力学参数差异较大,场地整体属于典型的上软下硬复合地层。

新建隧道位于全风化花岗岩地层中,既有 14 号线左右线位于砾质黏性土层和全风化花岗岩地层,其余既有隧道处于砾质黏性地层;既有桩基桩底位于全风化花岗岩和强风化花岗岩持力层。

表 1 土层力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of different strata

岩土编号	岩土名称	重度/(kN·m ⁻³)	凝聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(m·d ⁻¹)	泊松比	变形模量/MPa	弹性模量/MPa
<1-1>	素填土	17.1	12	8	0.1	0.30	2	10
<5-6-1>	中砂	20.6	5	30	20.0	0.27	3	15
<8-2-2>	硬塑砾质黏性土	18.9	27	22	0.1	0.29	4	20
<11-1-1>	全风化花岗岩	19.1	26	24	0.1	0.27	50	250
<11-1-2>	强风化花岗岩	19.5	18	27	0.7	0.26	100	500
<11-1-2>	强风化花岗岩(土状)	24.0						
<11-1-4>	中风化花岗岩	26.0	350	33	2.0	0.16	3 650	3 650

注: 强风化花岗岩和强风化花岗岩(土状)2个地层共用一个编号。

如图 1 所示的盾构穿越施工面临着重大挑战, 主要技术难题包括: ①盾构隧道处于上软下硬复合地层, 穿越扰动规律不明; ②新建盾构隧道与 5 号桩基和 2 号线右线属于超近距离穿越, 盾构施工-桩-既有隧道-地层相互作用复杂; ③盾构穿越复杂地下构筑物群, 既有构筑物间的相互作用机制不明。

2 数值模型与验证

2.1 三维数值模型

建立如图 1 所示穿越节点的三维有限元模型, 如图 2 所示。模型尺寸为 120 m×105 m×60 m, 模型中隧道距左、右边界与底部边界分别为 3.5D、5.9D、5.3D(D 为新建隧道外径, 下同), 桩基础距前后边界分别为 5.6D、7.0D, 可有效消除边界约束的影响。模型前后、左右、底面均约束法向位移, 上表面为自由边界。地层与构筑物采用八节点六面体实体单元进行网格划分, 并对隧道、桩基及其周围土体

的网络进行加密以提高计算精度。考虑桩基均为端承桩, 而且桩底持力层的弹性模量较大, 假定桩土之间不发生相对位移, 采用绑定(tie)约束。为对比桩基对盾构施工诱发扰动的影 响, 分别选取无桩基础断面 1 和有桩基础断面 2 进行重点分析(见图 2)。断面 1 距盾构始发边界 18 m(12 环); 断面 2 位于模型中部, 距盾构始发边界 52 m(35 环)。

盾构掘进过程的模拟是穿越数值分析的关键。模拟考虑了掌子面支护力、盾壳、同步注浆、衬砌的影响, 可以较准确地再现掘进过程(见图 3)。采用法向面荷载模拟掌子面支护力, 支护力在静止土压力的基础上提高 20 kPa^[13]。盾壳长 10.5 m, 假定为刚体。同步注浆采用法向面荷载模拟注浆压力、等效注浆层模拟浆液; 注浆压力设置为 200 kPa, 盾尾脱出 2 环后消散。采用逐环开挖模拟盾构掘进过程, 依次挖除对应环土体的同时激活盾壳与前方掌子面支护力, 同时移去盾尾盾壳, 并激活盾尾注浆压力、注浆层和管片衬砌。

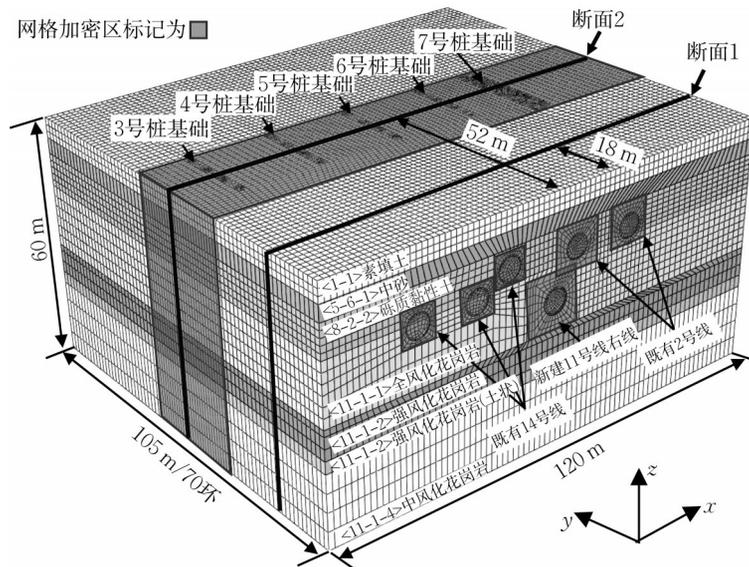


图 2 三维数值模型

Fig.2 Three-dimensional numerical model

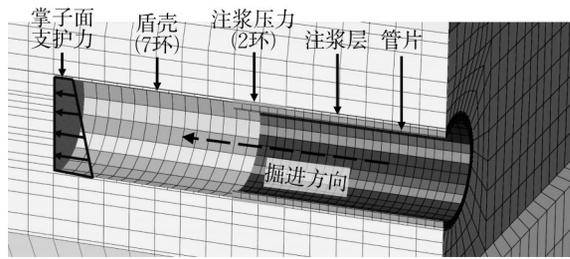


图3 盾构开挖模拟施工步

Fig.3 Steps of shield excavation simulation

根据深圳当地盾构模拟经验,地层采用摩尔-库伦模型^[14-16],相关模型材料参数如表1所示。桩基、隧道衬砌、隧道注浆层、盾壳采用线弹性模型,注浆层按照经验采用半固态参数^[17]。考虑到管片接缝及既有隧道损伤的影响,将新建隧道与14号线衬砌的弹性模量折减20%,将2号线衬砌的弹性模量折减25%^[15,18]。表2汇总了结构相关的模型参数。盾壳-土体、注浆层-土体、衬砌-注浆层界面均采用绑定约束。

表2 结构参数

Tab.2 Parameters of structures

构件	材料	重度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/MPa
11号线注浆层	水泥浆	12.00	4
11号线管片衬砌	混凝土	24.50	27 600
14号线管片衬砌	混凝土	24.50	27 600
2号线管片衬砌	混凝土	24.50	25 900
盾壳		109.73	
桩基	混凝土	24.50	31 500

在模拟穿越前,首先采用自重应力计算对地层施加初始地应力;然后,激活桩基和既有隧道的构筑物群,同时将构筑物对应位置的土体挖除;最后,采用如图3所示的盾构掘进模拟方法模拟新建隧道的施工过程,直至新建隧道施工完毕。分析结果时,以既有构筑物群激活后的计算步为初始参考点,仅考虑盾构穿越施工引起的变形和应力增量。

2.2 数值模型对比验证

图4对比分析了断面1处沉降槽的数值计算结果与深圳市11号线一期工程下穿3号线的地表沉降槽实测数据;一期工程案例的盾构隧道直径为6.0 m,埋深为20.0 m,地层条件均与本研究相似,并且具体位置与图1中的穿越节点仅相距2.0 km^[12];图4中,三角形标记的沉降槽是依据文献^[19]中的深圳地区沉降槽经验公式计算得到的结果。数值计算的沉降槽很好地再现了实测结果,并与深圳地区经验公式计算结果相吻合;数值计算的最大沉降为6.5

mm,实测最大沉降和经验预测最大沉降分别为6.3 mm和6.0 mm,数值计算结果误差小于8%。

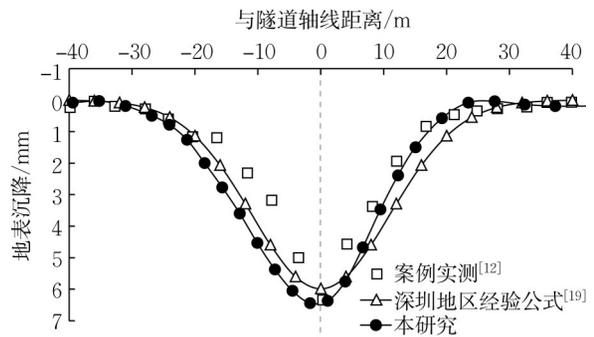


图4 沉降槽曲线对比验证

Fig.4 Comparison and verification of settlement trough curve

地层损失率(V_l)和最大沉降(S_{max})是衡量地表沉降槽的主要参数,两者均随轴线埋深与外径比(H/D)的增大而非线性减小^[20-21]。图5a对比分析了风化岩层中土压平衡盾构的实测统计数据与本研究的计算结果;在 $H/D=3.89$ 时,数值计算得到的 V_l 为0.52%,与实测 V_l 的范围一致。图5b对比了数值计算的最大沉降与风化岩层实测统计结果及经验预测结果。经验预测分别采用修正的Clough公式、Atkinson公式计算^[21]。在 $H/D=3.89$ 时,数值计算的6.5 mm最大沉降值与采用实测数据拟合曲线、修正Clough公式和修正Atkinson公式的预测结果吻合度较高,尤其是采用实测数据拟合的预测结果,差距仅为0.5 mm。综上可知,本节建立的数值模型和参数可以较真实地反映深圳地区复合地层盾构施工诱发的地表变形规律,可用于盾构穿越扰动规律和机制的分析。

3 盾构穿越扰动规律

3.1 桩基对地表沉降的影响

图6对比了盾构穿越过程中断面1和断面2的地表沉降结果。受桩基的影响,断面2的地表沉降值小于断面1。在盾构切口到达断面2D前,桩基的存在对地表沉降的影响有限,2个断面的地表沉降槽基本一致。在盾构切口到达断面时,盾构掘进已诱发了明显的地表沉降,断面2的最大沉降为1.2 mm,比断面1的最大沉降小0.3 mm;在桩基的位置,由于桩基自身刚度较大且桩底位于新建隧道以下位置,地表沉降发展受到了抑制,其沉降值远小于断面1,其中5号桩基础影响最为显著,沉降值减小

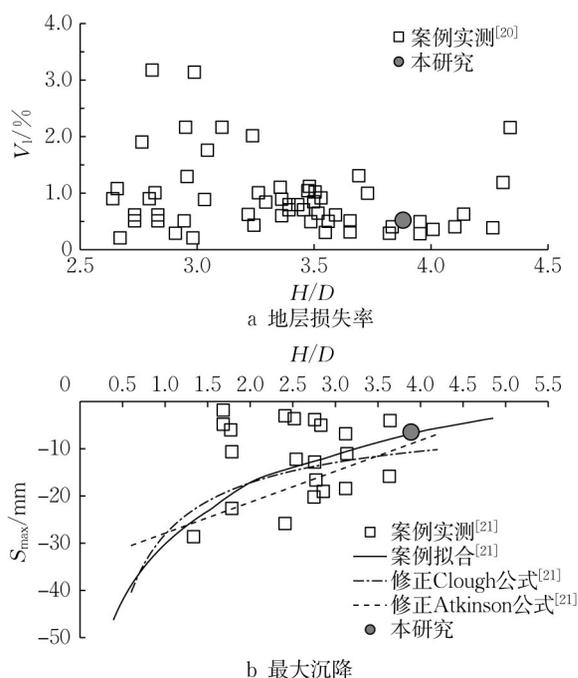


图5 地层损失率和最大沉降对比验证

Fig.5 Comparison and verification of ground loss rate and maximal settlement

了1.0 mm。在穿越完成后,断面1的沉降槽与经典Peck公式基本一致,但受既有隧道的影响,沉降槽中心与隧道中心并不重合,最大沉降为6.5 mm;受桩基的影响,断面2的沉降槽呈不规则分布,最大沉降和桩基位置的沉降均出现了明显减小,其中5号桩基处沉降由4.5 mm减小至2.3 mm,最大沉降减小为5.2 mm。另外,受桩基的影响,断面2沉降槽的宽度也略有减小,由断面1的60 m减小为52 m。综上所述可知,桩基的存在对盾构穿越诱发的地表沉降有明显的抑制作用,地表沉降和沉降槽宽度均减小。

3.2 桩基对既有隧道变形的影响

采用衬砌绝对位移和断面椭圆度来描述隧道的

变形情况,两者的定义如图7所示。绝对位移是指衬砌某点横向(x 向)与竖向(z 向)位移的矢量和,椭圆度指变形后断面的长轴与短轴之差与半径的比值。

穿越完成后,断面1处5条既有隧道的最终变形如图8所示,图中的变形均放大了200倍以更直观地展示变形规律。2号线右线隧道变形最大,发生在第三象限,最大值为9.6 mm;14号线出入线隧道变形次之,发生在第四象限,最大值为1.2 mm;其余3条隧道的变形较小。同时,2号线右线隧道和14号线出入线隧道的断面呈现明显的椭圆形,其余隧道则不明显。距离新建隧道的远近是呈现上述不同变形规律的本质原因。2号线距离新建隧道仅6.16 m,位于新建隧道右上方,所以其受扰动最大,发生了最大变形,而且变形朝向新建隧道。2号线左线、14号线左右线隧道因距离新建隧道太远,受扰动较小,未出现明显的变形,以下不作具体分析。5条既有隧道的最终变形均低于文献[22]中建议的安全限值20 mm,隧道结构整体处于安全状态。

图9分析了断面1和断面2处2号线右线、14号线出入线隧道在穿越过程中的变形规律,图中的变形亦放大了200倍。如图9a所示,2个断面处2号线右线隧道变形的大小、模式和发展历程基本一致。在盾构切口到达断面1D前,新建隧道掘进的影响有限,2号线右线隧道未出现明显变形。在盾构切口到达断面时,穿越引起了2号线右线隧道朝向新建隧道的变形,2个断面的最大变形均为2.1 mm,且变形后断面呈椭圆形,长轴指向新建隧道轴线。在穿越完成后,断面1处的最大变形为9.7 mm,略大于断面2处的9.6 mm,这与断面2处既有桩基抑制了变形发展有关。因新建隧道与2号线右线之间没有桩

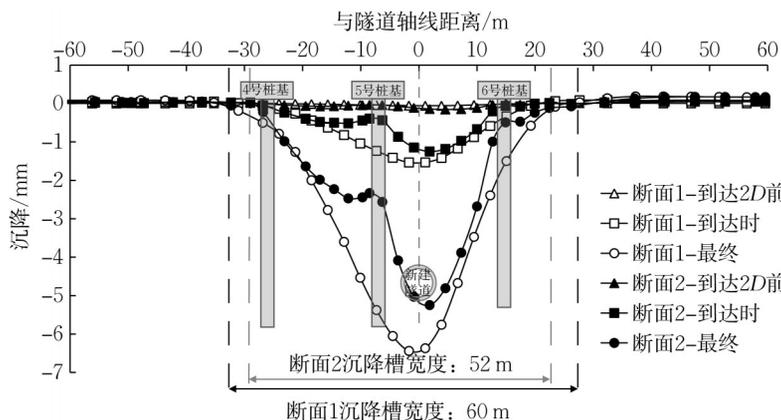


图6 断面1和断面2的地表沉降

Fig.6 Ground surface settlement of section 1 and section 2

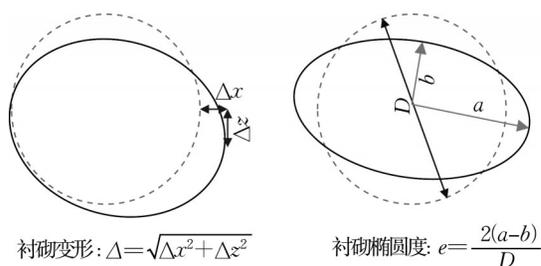


图 7 衬砌变形与椭圆度示意图

Fig.7 Schematic diagram of lining deformation and ellipticity

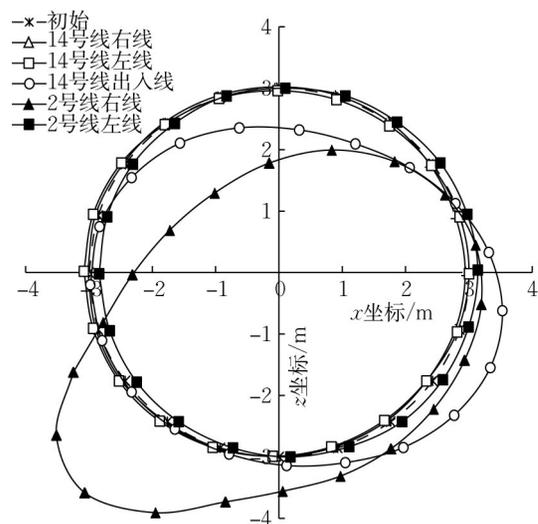


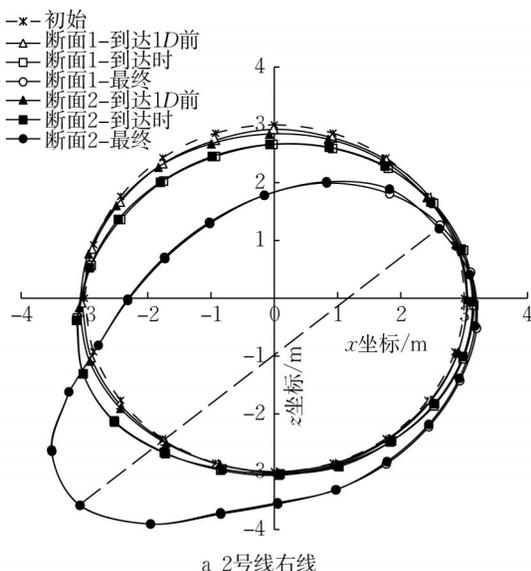
图 8 断面 1 处 5 条既有隧道的最终变形(从盾构掘进方向观察,变形放大 200 倍)

Fig.8 Final deformation of 5 existing tunnels in section 1 (Observed from the direction of excavation and the deformation is magnified 200 times)

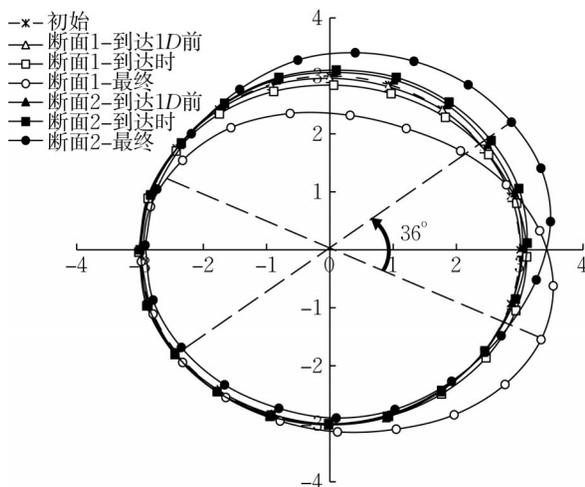
基,桩基的影响较小,仅产生了 0.1 mm 的差异。

与 2 号线右线不同,14 号线出入线隧道在断面 1 和断面 2 处呈现了不同的变形模式和变形(见图 9b)。在盾构切口到达断面 1D 前,断面 1 和断面 2 处变形未呈现明显差异。当盾构切口到达断面时,新建隧道引起了显著扰动,断面 1 处发生了朝向新建隧道的变形,最大变形为 0.9 mm;因桩基的影响,断面 2 处发生了向第一象限的变形,最大值为 0.8 mm。这是因为桩基刚度较大且位于新建隧道和既有隧道之间,桩基的变形协调改变了既有隧道的变形模式。当穿越完成时,断面 1 处最大变形为 4.1 mm,隧道呈现椭圆形,右上方受到较大的偏压,长轴向新建隧道方向偏移;断面 2 处最大变形为 3.0 mm,隧道也呈现椭圆形,但长轴方向较断面 1 处长轴逆时针旋转了 36°,左上部受较大偏压。

表 3 汇总了 2 个断面处 2 号线右线和 14 号线出



a 2 号线右线



b 14 号线出入线

图 9 2 个断面处盾构穿越过程中既有隧道变形演变规律(从盾构掘进方向观察,变形放大 200 倍)

Fig.9 Deformation of existing tunnels at two sections during shield crossing (Observed from the direction of excavation and the deformation is magnified 200 times)

入线隧道的椭圆度。

表 3 2 个断面处既有隧道椭圆度

Tab.3 Ellipticity of existing tunnels at two sections during crossing

既有线名称	断面序号	椭圆度/‰		
		到达断面 1D 前	到达断面时	最终
2 号线右线	1	0.18	0.58	2.10
	2	0.22	0.54	2.07
14 号线出入线	1	0.08	0.24	0.97
	2	0.13	0.17	0.43

2 号线右线隧道在断面 1 和断面 2 的椭圆度变化一致,最终椭圆率均在 2‰ 左右,桩基对其几乎无影

响。14 号线出入线隧道在断面 1 处的椭圆度为 0.97‰,因受 5 号桩基的影响,断面 2 处的椭圆度减小至 0.43‰。这表明,当新建隧道与既有隧道之间存在桩基时,桩基对穿越扰动具有明显的隔断效应。穿越过程中,5 条既有线的椭圆度均低于文献[23]建议的警戒值 6‰。

4 桩基变形及桩-土-隧相互作用机制

采用挠曲和承台倾斜率来描述桩基的变形,两者的定义如图 10 所示。横向挠曲和纵向挠曲分别指桩基在 x 轴方向和 y 轴方向上的变形,与坐标轴同向为正;承台倾斜率是指承台横纵两端的差异沉降与横纵两端水平间距的比值,顺时针为正。由于桩底均位于全风化、强风化花岗岩持力层,满足桩基承载需求,以下不对桩身轴力进行分析。

4.1 桩身挠曲

图 11 汇总了 5 个桩基在盾构切口到达桩基时的纵向挠曲和穿越完成时的横向挠曲。5 号桩基的纵向挠曲和横向挠曲最大,最大横向和纵向挠曲分别为 -2.10 mm 和 0.51 mm;6 号桩基的横向和纵向挠曲次之,最大值分别为 1.30 mm 和 0.35 mm;其余桩

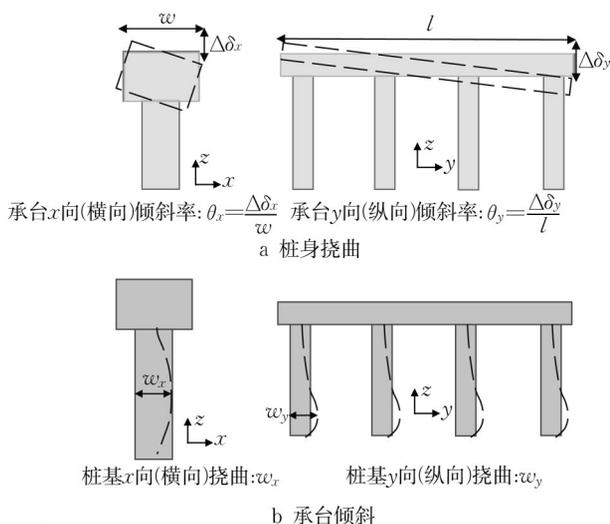


图 10 承台倾斜与桩身挠曲示意图

Fig.10 Schematic diagram of viaduct pier inclination and pile deflection

基的挠曲较小。上述差异变形是因既有桩基与新建隧道的距离不同引起的,距离越小,隧道施工扰动越大。5、6 号桩基与新建隧道的净距分别为 3.96 m 和 9.60 m,新建隧道施工扰动较大,挠曲变形也大;其余桩基因距离较远,桩基挠曲不明显,以下不作具体分析。

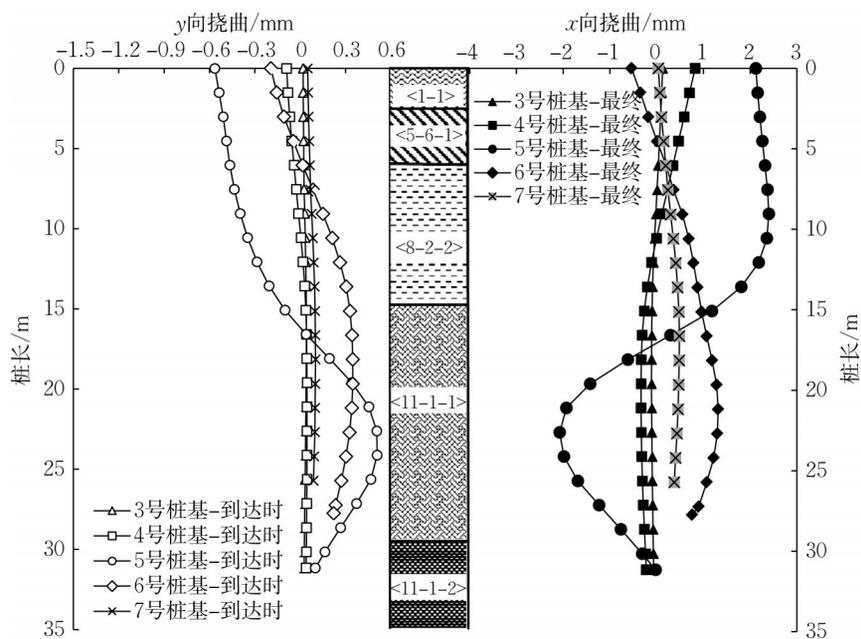


图 11 5 个桩基的典型挠曲曲线

Fig.11 Typical deflection curves of 5 piles

为进一步分析穿越过程中 5 号和 6 号桩基的变形发展规律,图 12 汇总了盾构到达桩基 2D 前、盾构到达桩基和盾构脱出桩基 2D 后 3 个典型时刻 5、6 号

桩基的横向挠曲和纵向挠曲。在盾构到达 2D 前,受掌子面支护压力的影响,2 个桩基均受到挤压作用,出现远离隧道的横向挠曲,但此时的挠曲较小,在

0.3 mm以内。在盾构到达桩基时,掌子面支护压力的影响增大,5号和6号桩基在新建隧道深度的横向挠曲进一步增大,最大值分别为-0.9 mm和0.7 mm;在浅部出现了反向挠曲,但受到既有14号线的影响,5号桩基在浅部的变形更大且变形零点下移

(见图12a)。盾构脱出桩基后,桩身挠曲进一步增大,在新建隧道埋深范围内,5号和6号桩基最大挠曲分别达到-2.1 mm和1.3 mm,此阶段的横向挠曲主要受新建隧道结构的横向挤压变形影响;在浅部,5号桩基在14号线出入线埋深范围内出现较大

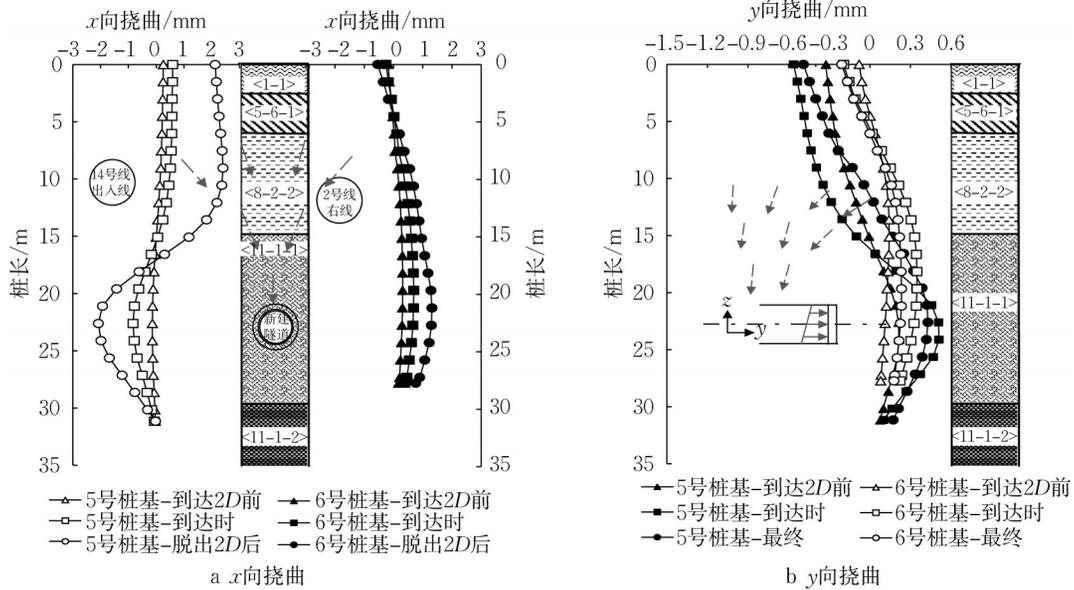


图12 穿越过程中5、6号桩基挠曲演变规律

Fig.12 Deflection curves of the 5th and 6th piles during crossing

的靠近新建隧道轴线的横向位移,达到了2.3 mm,而6号桩基的最大反向挠曲出现在桩顶,约0.5 mm(见图12a)。在桩底区域,3、4、5号桩基桩底位于刚度较大的强风化花岗岩层,在穿越过程中位移几乎为零,而6、7号桩基的桩底位于刚度较小的全风化花岗岩层,出现较小的位移。相比文献[2]中软土地区盾构侧穿桩基的结果,本研究中桩基底部位移明显更小,主要是桩底受复合地层中刚度较大的岩性地层的约束。

倾斜率均先增大后减小,最后趋于0%。这是由于在盾构穿越过程中,盾构掘进导致的地表不均匀沉降和y向位移(见图12b)经历了先增大后减小的变化历程。5、6号承台最大纵向倾斜率分别为-0.09%和-0.02%,倾斜率较小。然而,6号承台的横向倾斜率却出现了逐渐增大的趋势,直至盾尾脱出承台2D后稳定在-0.18%。这是因为6号桩基在盾构穿越过程中受到新建隧道衬砌变形的挤压与上部土体位移的共同作用。因受14号线既有隧道的影响,5号承台的横向倾斜率经历多个变化阶段,最大值仅为-0.02%,这是桩-土-隧相互作用的结果,将在下一节中具体分析。

既有隧道对桩基的纵向变形影响较小,在穿越过程中5、6号桩基的纵向挠曲变形规律相似(见图12b)。在盾构到达桩基前,受掌子面支护力的影响,在新建隧道埋深范围内出现与盾构掘进同向的纵向挠曲;在盾构切口到达桩基时纵向挠曲进一步发展,5号和6号桩基的最大值分别为0.51 mm和0.35 mm;在盾构脱出桩基2D后纵向位移稍有恢复,分别减小至0.43 mm和0.23 mm。桩基顶部的纵向挠曲因与盾构后方沉降土体的变形协调而出现了与掘进方向相反的趋势。

4.3 桩-土-隧相互作用机制

4.2 承台倾斜率

为进一步解释5号承台横向倾斜率的变化规律,图14对比分析了断面2内14号线出入线衬砌上距桩基最近节点(D1)的水平位移、5号桩基附近土体单元节点(D2)水平位移和两节点之间的土体单元(S1)水平应力增量的变化规律。模型中以受压为负,图14中S1水平应力减小表明土体水平压应力增大,反之表明土体水平压应力减小。除新建11号线右线隧道附近小范围内的部分土体外,包括S1在内的土体均处于弹性状态。

图13汇总了5、6号桩基承台在盾构掘进过程中横向与纵向倾斜率的演变规律。5、6号承台的纵向

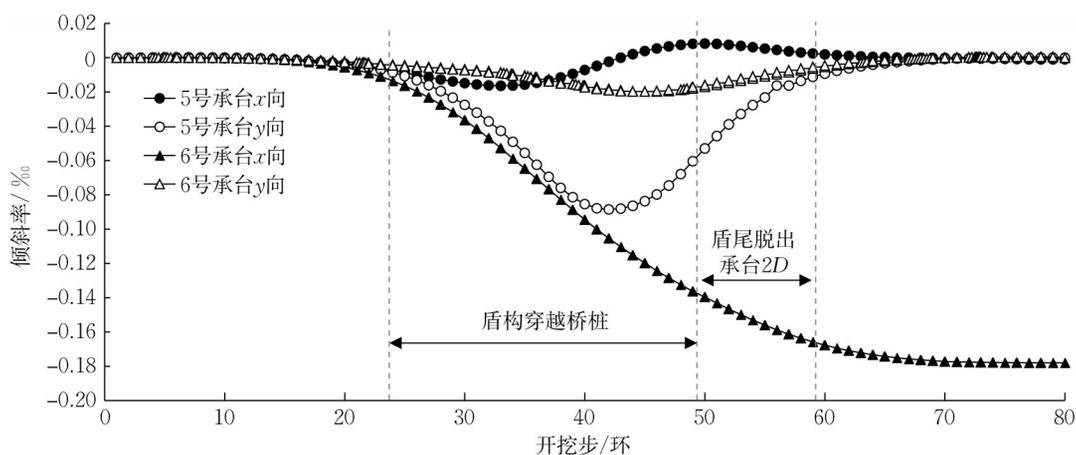


图13 穿越过程中5、6号承台倾斜率演变

Fig.13 Evolution of inclination of the 5th and 6th piles during crossing

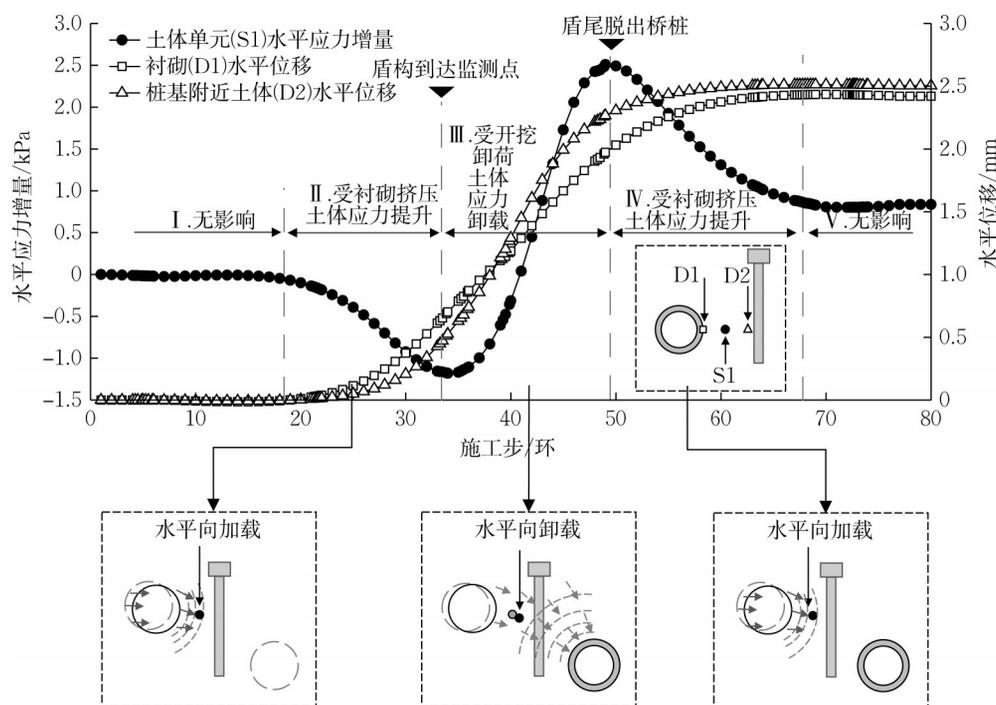


图14 监测点节点位移与水平应力增量

Fig.14 Horizontal displacement and horizontal stress increment of monitoring points

综合土体的节点位移和土体应力的演变趋势,5号桩基位置处的桩-土-隧相互作用机制可分为5个阶段:

(1)阶段I。盾构距离桩基较远,盾构掘进引起的位移和水平应力增量均无明显变化。

(2)阶段II。盾构接近桩基时,既有14号线出入线受盾构掘进的影响,发生移向新建隧道的变形,因其刚度比周围土体大,虽然盾构未达到桩基位置,但14号线的变形却沿纵向传递到桩基位置(见图9b),D1的水平位移开始增大,且增量大于D2,挤压桩隧间土体,导致S1压应力增大,最大增量为-1.2

kPa,进而引起5号桩基的负向倾斜(见图13);反之,由于桩基的自身刚度,14号线出入线的变形也受到抑制。

(3)阶段III。盾构到达桩基时,受盾构开挖导致地层损失的影响,5号桩基发生向新建隧道的变形,引起了桩隧间土体S1的卸载,卸载量为3.8 kPa;14号线D1位置的水平位移进一步增大,并且D2的水平位移增量大于D1,说明两点之间的距离增大,S1处于卸载状态。

(4)阶段IV。盾构穿越后,隧道掘进施工扰动影响主要通过既有14号线的纵向传递影响桩基的变

形, D1水平位移增长速度大于D2, 桩隧之间的土体被压缩, S1水平向加载, 加载量为2.0 kPa, 此阶段机制与阶段II一致。

(5)阶段V。盾构距离监测断面较远时, 盾构掘进几乎无影响, D1和D2的水平位移和S1的水平应力趋于稳定。

上述分析表明, 桩-土-隧相互作用机制的本质是桩基、隧道和土体的刚度差异, 同时由于上述刚度差异, 盾构掘进扰动在纵向的影响范围增大。因此, 盾构开挖卸荷导致的地表位移以及阶段II、IV中所述的变形传递作用, 均可引起5号桩基桩身向 x 轴正向的位移, 这解释了图12a中5号桩基上部过大的横向位移以及其横向倾斜率的复杂变化趋势。

5 结论

(1)桩基的存在会减小隧道施工引起的地表沉降和沉降槽宽度, 改变盾构穿越诱发既有隧道衬砌的变形模式, 使得临近隔桩隧道的椭圆变形的长轴朝竖向偏转, 对扰动的传递具有明显的隔断效应。

(2)桩-土-隧之间复杂的相互作用机制的根本原因是桩基、隧道和复合地层上部土体的刚度差异。桩基变形与承台倾斜受到既有隧道衬砌变形纵向传递的影响, 桩身在既有埋深范围内出现较大的横向位移, 桩基承台倾斜变化表现出复杂的波动规律。桩底受到复合地层底部刚度较大的岩性地层的约束, 其位移不明显。

作者贡献声明:

王秋实:数值模拟与论文撰写。

丁文其:资助获取、论文整体构思与论文修改。

乔亚飞:模拟方法指导与论文修改。

刘厚朴:图表绘制与数据分析。

参考文献:

- [1] 陈湘生, 李兴高. 复杂环境下盾构下穿运营隧道综合技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2011.
CHEN Xiangsheng, LI Xinggao. Comprehensive technology of shield tunneling undergoing operational tunnel in complex environment [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2011.
- [2] 奚晓广, 何君佐, 廖少明, 等. 软土盾构超近距离侧穿桥墩桩基的变形传递分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1190.
XI Xiaoguang, HE Junzuo, LIAO Shaoming, *et al.* Deformation transmission law between pier and pile of viaduct

caused by adjacent shield tunneling in soft ground [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1190.

- [3] 葛世平, 谢东武, 丁文其, 等. 考虑建筑既有变形的盾构穿越扰动控制标准[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 1616.
GE Shiping, XIE Dongwu, DING Wenqi, *et al.* Undercrossing disturbance control criterion for shield tunnel with consideration of building existing deformation [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2011, 39(11):1616.
- [4] 葛世平, 谢东武, 丁文其, 等. 盾构穿越保护建筑数值模拟预测与监控量测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(10): 1463.
GE Shiping, XIE Dongwu, DING Wenqi, *et al.* Simulation and monitoring of shield tunnel undercrossing historic building [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(10):1463.
- [5] HERGARDEN H J A M, VAN DER POELJ T, VAN DER SCHRIERJ S. Ground movements due to tunnelling: influence on pile foundations[C]//Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1996: 519-524.
- [6] CHEN L T, POULOS H G, LOAGNATHAN N. Pile responses caused by tunneling [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 207.
- [7] 史渊, 尹燕良, 吕鹏洲, 等. 隔离桩对双线盾构近距离侧穿高铁桥梁桩基的变形控制分析[J]. 公路, 2021, 66(5): 322.
SHI Yuan, YIN Yanliang, LÜ Pengzhou, *et al.* Analysis on the deformation control of isolation pile to the double-track shield crossing the pile foundation of the high-speed railway bridge at a close distance [J]. Highway, 2021, 66(5): 322.
- [8] 江帅, 朱勇, 栗青, 等. 隧道开挖地表沉降动态预测及影响因素分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(1): 195.
JIANG Shuai, ZHU Yong, LI Qing, *et al.* Dynamic prediction and influence factors analysis of ground surface settlement during tunnel excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(1):195.
- [9] 何川, 苏宗贤, 曾东洋. 地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. 土木工程学报, 2008(3): 91.
HE Chuan, SU Zongxian, ZENG Dongyang. Influence of metro shield tunneling on existing tunnel directly above [J]. China Civil Engineering Journal, 2008(3): 91.
- [10] 汪洋, 何川, 曾东洋, 等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报, 2010, 32(2): 79.
WANG Yang, HE Chuan, ZENG Dongyang, *et al.* Model test and numerical simulation of influence of perpendicular undercross shield tunnel construction on existing tunnel [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(2): 79.
- [11] 张琼方, 夏唐代, 丁智, 等. 盾构近距离下穿对已建地铁隧道的位移影响及施工控制[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3561.
ZHANG Qiongfang, XIA Tangdai, DING Zhi, *et al.* Effect of nearby undercrossing tunneling on the deformation of existing

- metro tunnel and construction control [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3561.
- [12] 金大龙. 盾构隧道群下穿既有地铁运营隧道变形机理及控制研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
JIN Dalong. Research on mechanism and control of existing subway tunnel deformation induced by multi-crossing of shield tunnel underneath [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [13] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Shield tunnel [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.
- [14] 何祥凡, 申兴柱, 王帆, 等. 盾构隧道穿越上软下硬地层施工力学特性分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(2): 89.
HE Xiangfan, SHEN Xingzhu, WANG Fan, *et al.* Construction mechanical property analysis of shield tunnel through upper-soft and lower-hard stratum [J]. *Railway Standard Design*, 2017, 61(2): 89.
- [15] 吴双武, 李辉, 许焯霜, 等. 深圳上软下硬地层中超深基坑的性状分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 330.
WU Shuangwu, LI Hui, XU Yeshuang, *et al.* Analysis on the performance of ultra-deep foundation pit in weathered rock ground covered by sand in Shenzhen stratum [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(2): 330.
- [16] 霍晓龙, 陈寿根. 上软下硬地层中盾构开挖面稳定的可靠度研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 854.
HUO Xiaolong, CHEN Shougen. Research on reliability of excavation face stability during shield tunneling in upper-soft lower-hard ground [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(4): 854.
- [17] 谢东武. 既有建筑-土体-盾构隧道相互作用机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
XIE Dongwu. Study on the interaction mechanism of existing building-soil-shield tunnel [D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [18] 丁智, 吴云双, 张霄, 等. 软土盾构隧道近距离穿越既有地铁影响数值分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 663.
DING Zhi, WU Yunshuang, ZHANG Xiao, *et al.* Numerical analysis of influence of shield tunnel in soft soil passing over existing nearby subway [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(3): 663.
- [19] 吴波. 软硬不均地层盾构法隧道施工技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
WU Bo. Shield tunnel construction technology in uneven soft and hard ground [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2021.
- [20] 吴昌胜, 朱志铎. 不同隧道施工方法引起地层损失率的统计分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 19.
WU Changsheng, ZHU Zhiduo. Statistical analysis of ground loss ratio caused by different tunnel construction methods in China [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, 53(1): 19.
- [21] 朱才辉, 李宁. 地铁施工诱发地表最大沉降量估算及规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3543.
ZHU Caihui, LI Ning. Estimation and regularity analysis of maximum surface settlement induced by subway construction [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3543.
- [22] 深圳地铁有限公司. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJT202—2013[S]. 深圳: 深圳地铁有限公司, 2013.
Shenzhen Metro Co., Ltd. Technical code for protection structures of urban rail transit: CJJT202—2013[S]. Shenzhen: Shenzhen Metro Co., Ltd., 2013.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Metro design specification: GB50157—2013[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.