

滨海地区盾构隧道近接下穿既有车站施工力学特性研究

戴 军

(嘉善经济技术开发区实业有限公司, 浙江 嘉兴 314100)

摘 要: 依托福州地铁滨海快线福东区间下穿既有地铁4号线工程,采用FLAC3D平台开展精细化数值模拟。基于盾构掘进过程中的土体-盾构相互作用(如掌子面压力、注浆压力、盾壳摩擦力、刀盘扭矩)以及同步注浆的硬化与压力消散的影响,探讨邻近车站条件下盾构隧道近接下穿的施工力学特性。数值模拟与实测结果表明:既有地铁4号线车站及区间隧道在盾构掘进过程中以沉降为主,变形特征由单线下穿的“V型”演化为双线下穿后的“W型”。既有地连墙对土体变形主要表现为阻隔和牵制,有效减小既有4号线车站及区间隧道的变形。研究结论可为相似条件下盾构近接下穿工程的设计与施工提供理论支撑与实践参考。

关键词: 邻近车站;下穿施工;地连墙;同步注浆;现场监测;对比验证;变形控制

中图分类号: TU91

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0293-07

Research on Construction Mechanics Characteristics of Shield Tunneling near Existing Stations in Coastal Areas

DAI Jun

(Jiashan Economic and Technological Development Zone Industrial Co., Ltd., Jiaxing 314100, China)

Abstract: Relying on the project of the Fudong section passing under the existing Metro Line 4 in Fuzhou Metro Binhai Express Line, the refined numerical simulation is carried out based on the FLAC3D platform. Based on the consideration of the soil-shield interaction during the shield tunneling process (such as face pressure, grouting pressure, shield shell friction force, cutter head torque), and the hardening and pressure dissipation of synchronous grouting, the construction mechanics characteristics of the near-passing of shield tunnels under the adjacent stations are discussed. The numerical simulation and measured results show that the existing stations and interval tunnel of Metro Line 4 are dominated by settlement during the shield tunneling, and the deformation features evolve from a “V shape” with a single-line underpassing to a “W shape” after a double-line underpassing. The existing diaphragm wall mainly manifests as barriers and restraints on soil deformation, which can effectively reduce the deformation of the existing stations and interval tunnel of Metro Line 4. The research conclusions can provide theoretical support and practical reference for the design and construction of shield near-tunneling projects under similar conditions.

Keywords: adjacent stations; tunneling construction; diaphragm wall; synchronous grouting; field monitoring; comparison validation; deformation control

0 引 言

随着城市地铁建设规模的快速发展,新建盾构隧道与既有轨道交通线路交叉穿越的工况愈发普遍,复杂周边环境使得新建隧道穿越面临更大风险^[1]。国内外学者依托数值模拟、现场实测等技术手段,针对盾构下穿既有隧道引发的结构变形规律开展了大量研究。

Liu等^[2]以北京地铁某盾构区间隧道为工程实例,利用FLAC3D数值平台,分析了盾构下穿过程中既有隧道和地表的变形规律。白海卫等^[3]汇总北京13项下穿工程案例,分析了隧道相对位置、长度及洞室数量等因素和既有隧道变形的关系。Fu等^[4]依托长沙地铁3号线下穿既有高速铁路隧道,提出下穿施工的控制对策。高利宏等^[5]和杨荟斯等^[6]在MIDAS数值平台上模拟双线隧道下穿施工,分析了既有隧道沉降的变化规律,并提出相应的关键节点控制措施。路德春等^[7]基于ABAQUS平台优化盾构施工全周期数值模拟方法,阐释新建隧道下穿对既

收稿日期: 2026-04-09

作者简介: 戴军(1980—),男,本科,工程师,从事建筑、市政、机电、水利、电力工程施工管理等工作。

有结构变形的作用机理。李本^[8]和张庆等^[9]基于FLAC3D数值平台,模拟盾构掘进对邻近既有车站的力学影响。杨万精等^[10]以西安地铁5号线下穿既有2号线为工程背景,在FLAC3D数值平台上建立盾构下穿的精细化数值模型,提出了微扰动下穿的施工参数和方法。何占坤等^[11]结合杭州地铁5号线下穿杭州南站工程,分析施工引发的地表与车站结构沉降、桩基变形规律,并提出针对性的施工控制措施。沈宇鹏等^[12]基于北京地铁3号线新建隧道紧邻14号线朝阳公园站工程,利用数值模拟研究侧邻既有车站条件下隧道开挖面的稳定性特征。

尽管国内外学者对盾构隧道的下穿施工进行过不少研究^[13],但在地连墙保护下的新建隧道下穿既有车站和隧道的研究较为缺乏。因此,本文将采用interface模拟地连墙-土界面接触,避免刚性连接假设,建立盾构掘进及注浆材料时变刚度与注浆压力消散的精细化数值模型。基于工程实测与无地连墙对比工况,定量分析并揭示了地连墙的阻隔-牵制效应。本文依托福州地铁滨海快线近接下穿地铁4号线工程,基于FLAC3D数值平台,考虑地层损失及机-土相互作用,开展盾构掘进精细化数值模拟,探究下穿施工对邻近地铁4号线区间隧道及车站的变形规律,并通过现场实测数据校验模拟结果,为同类近接下穿工程提供技术借鉴。此外,针对当前隧道施工智能化发展趋势,本文初步采用了基于现场监测数据的动态反馈与预警思路,可供后续研究参考。

1 工程概况

福州地铁滨海快线起于福州火车站站,止于文岭站,线路全长约62.4 km,共设15座车站,设计最高运行速度140 km/h。区间隧道采用盾构法施工,衬砌外径8.3 m,内直径7.5 m,环宽1.8 m,采用“4+2+1”分块错缝拼装工艺,衬砌混凝土强度等级为C50。

滨海快线福州火车站站—东门站区间,紧邻地铁4号线东门站,以89°交角下穿地铁4号线东门站—三角池站区间,3者平面位置关系如图1所示。其中,右线下穿段里程为YDK5+194.147—YDK5+222.414,共计16环;左线下穿段里程为ZDK5+194.702—ZDK5+223.438,共计17环。

滨海快线福东区间与地铁4号线东门站及东三区间的剖面位置关系如图2所示。地铁4号线东门站为地下二层单柱双跨钢筋混凝土结构,总长297 m,宽约19.5~22.5 m,顶板埋深约4.0 m;车站基坑开挖

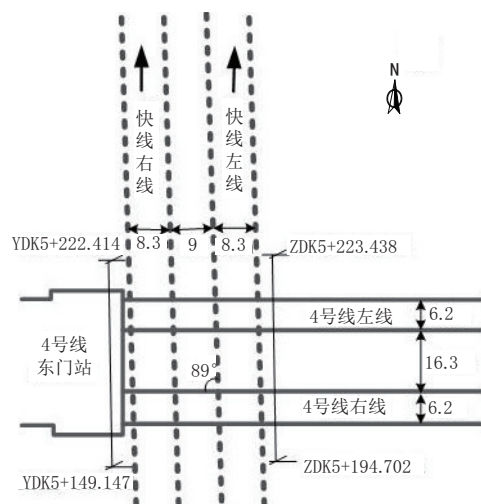


图1 滨海快线与地铁4号线的平面位置关系图(单位:m)

深度约17.4~19.5 m,围护结构采用800 mm厚地连墙加内支撑的支护体系,端头井部分地连墙深度达30.5 m。地铁4号线东三区间隧道衬砌外径6.2 m,内径5.5 m,环宽1.2 m,隧顶埋深约12 m。滨海快线福东区间隧顶埋深约20.7 m,其中右线与地铁4号线右线、左线的竖向净距分别为2.64 m和2.92 m,左线与地铁4号线右线、左线竖向净距分别为2.37 m和2.66 m。

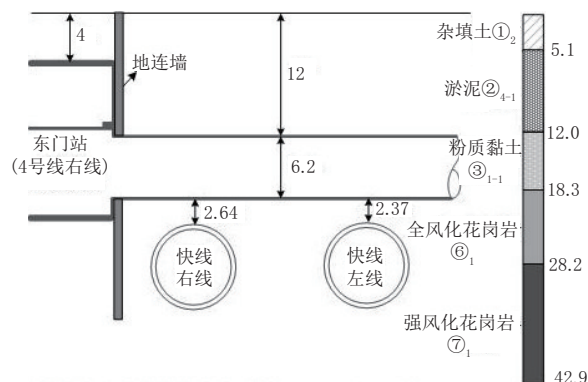


图2 滨海快线与地铁4号线的剖面位置关系图

工程地质:下穿段场地整体较为平坦,覆盖层自上而下依次为:杂填土<1-2>层厚0.0~7.9 m、淤泥<2-4-1>层厚0.5~9.9 m、粉质黏土<3-1-1>层厚1.2~13.5 m、全风化花岗岩<6-1>层厚3.0~12.6 m、强风化花岗岩(砂土状)<7-1>层厚7.3~15.8 m。各土层相关物理力学参数取值如表1所示^[14]。场地地下水种类可分为潜水和承压水2类。杂填土中地下水主要为上层滞水,补给来源以大气降水和地表水为主,稳定水位埋深为1.10~4.70 m,水位变化幅度一般为1~3 m。粉质黏土、淤泥被视为相对隔水层。承压水则主要存在全风化花岗岩和强风化花岗岩之中,透水性及富水性较弱,水量较小。地下水补给来源主要为含水层侧向径流补给及上部含水层垂向补

给,整体表现为弱承压水,对混凝土结构无侵蚀性。

表 1 各土层物理力学参数

名称	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 C / kPa	内摩擦 $\varphi / (^{\circ})$	弹性模量 E / MPa
杂填土	18.0	5.5	24.1	10.2
淤泥	15.8	11.7	8.6	9.5
粉质黏土	18.6	31.7	15.6	25.9
全风化花岗岩	18.3	25.4	26.1	30.6
强风化花岗岩	22	35	38	50

2 盾构隧道近接下穿的精细化数值模拟

2.1 数值模型

根据工程原型,在FLAC3D平台上搭建三维数值模型,整体尺寸分别为长120 m、宽120 m、高60 m,如图3所示。地层和既有车站采用六面体 zone 单元模拟,隧道衬砌采用 shell 单元模拟,共包括591 972个 zone 单元、296 969个 shell 单元。重点关注地铁4号线的车站与区间隧道部分,对下穿段网格进行加密,如图4所示。模型顶部设为自由边界,四周采用法向约束,底部施加全约束边界条件。

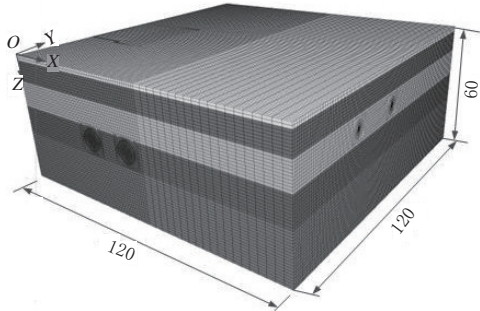


图 3 数值模型整体示意图

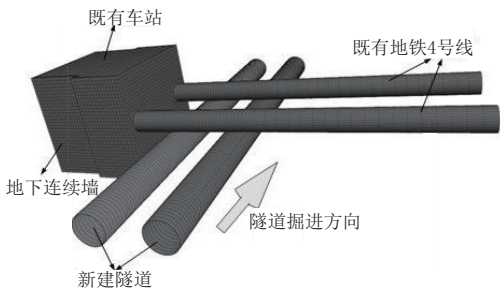


图 4 数值模型中主要结构示意图

2.2 岩土体本构及参数

对于摩擦性土或强度较高的岩土,摩尔-库仑模型(MC)能够较好地反映其强度控制特性;而修正剑桥模型(MCC)更能体现软弱黏性土固结特性和应力-应变关系。故杂填土、全风化花岗岩和强风化花岗岩采用摩尔-库仑(MC)本构模型,粉质黏土和淤泥采用修正剑桥(MCC)本构模型,结合工程实际情况,数值模拟中将实际土体参数进行等效处理。

相应物理力学参数取值如表2所示。其中, M 为常规三轴压缩试验在 $q-p$ 坐标下临界破坏线的斜率; λ 为等向三轴压缩试验中 $v-\ln p$ 加载曲线的斜率,表征了土体加载时的刚度; κ 为等向三轴压缩试验中 $v-\ln p$ 回弹曲线的斜率,表征了土体卸载或再加载时的刚度; v_0 为 $v-\ln p$ 曲线上的初始参考点,通常取标准大气压下的初始孔隙比 e_0+1 。

表 2 岩土体物理力学参数

	杂填土	淤泥	粉质黏土	全风化花岗岩	强风化花岗岩
弹性模量 E / MPa	10.2	—	—	30.6	50
重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	18.0	15.8	18.6	18.3	22
泊松比 μ	0.35	0.33	0.25	0.3	0.27
黏聚力 c / kPa	5.5	11.7	31.7	25.4	35
摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	24.1	8.6	15.6	26.1	38
破坏常数 M	—	0.40	0.44	—	—
固结参数 λ	—	0.069	0.302	—	—
回弹参数 κ	—	0.009	0.033	—	—
初始孔隙比 v_0	—	1.882	2.614	—	—

2.3 结构体本构及参数

结构体包含既有隧道衬砌、既有车站、新建隧道衬砌、注浆等代层、盾构机壳等5部分。其中,既有车站和注浆等代层采用 zone 单元;既有隧道衬砌、新建隧道衬砌和盾构机壳均采用 shell 单元,网格大小与该侧 zone 单元面相同。结构体统一采用弹性本构模型,物理力学参数取值如表3所示。地连墙和土体的接触方式采用施加 interface 接触面实现。基于文献查阅与资料整理,各参数具体数值见表4。

表 3 结构体物理力学参数

名称	弹性模量 E / MPa	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	厚度 t / m
盾构机壳	2.06e5	78.5	0.25	0.2
既有车站	3.14e4	25.0	0.25	—
地铁4号线	2.59e4	25.0	0.2	0.35
快线衬砌	2.59e4	25.0	0.2	0.4
注浆等代层	0.9 ~ 400	23	0.3	0.12

表 4 墙-土 interface 接触面单元模拟参数

黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa
1e-6	1e-6	1e-6	1e-6

2.4 盾构掘进施工过程的动态模拟及施工步

同时考虑盾构机与土体的相互作用,在掘进过程中施加相关作用力(土仓压力、注浆压力、盾壳摩擦力、刀盘扭矩),并通过改变等代层参数模拟同步注浆硬化及压力消散的过程。

根据相似地层的现场掘进实测数据,掘进过程

中的土仓压力约为 2.05 ~ 2.15 bar, 总推力约为 $1.7 \times 10^4 \sim 1.9 \times 10^4$ kN, 刀盘扭矩约为 1 600 ~ 1 700 kN·m, 初始注浆压力约为 0.25 ~ 0.30 MPa。在数值模拟中采用其均值^[15], 并反向施加至地层, 用以分析盾构施工引发的周边环境效应, 如图 5 所示。

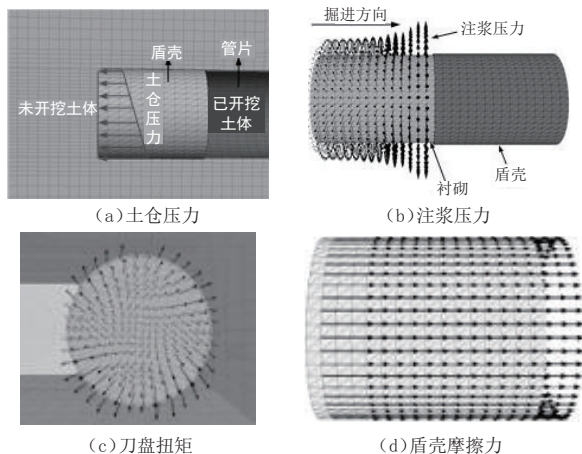


图5 施工参数模拟效果示意图

通过采用刚度迁移法对盾构机掘进全过程进行动态模拟, 如图 6 所示。本次模拟中, 将盾构掘进过程简化为刚度(等代层)与载荷的迁移过程。盾构主机长度约 9 m, 故取 5 环(9 m)为一个施工步, 采用 null 模型模拟土体开挖, shell 单元模拟盾构机壳, 对周围地层施加注浆压力和盾壳摩擦力, 对开挖面施加土仓压力和刀盘扭矩(如图 5 所示)。注浆材料硬化及注浆压力消散, 参考李培楠等^[16]对同步注浆全过程压力变化的研究。结合本工程现场实测浆液初凝时间及压力监测数据初始模量取 0.9 MPa(对应初始注浆材料), 8 ~ 12 h 后增长至 4 MPa, 24 h 后达到 400 MPa(完全硬化), 如图 7 所示。注浆压力初始施加 0.30 MPa, 随后降低为 0 MPa。

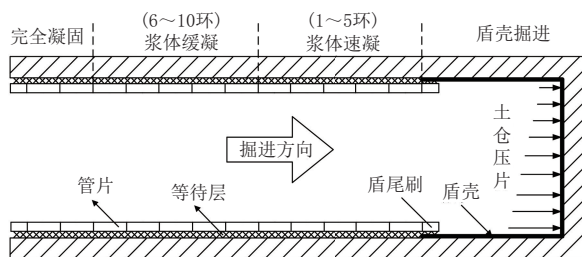


图6 精细化动态掘进过程示意图

由数值掘进施工过程的动态模拟, 将每段开挖都保存为一个施工步, 左线 14 个, 右线 14 个, 共 28 个施工步。限于篇幅, 重点关注以下 6 个施工步, 如图 8 所示。

3 近接下穿的既有结构变形分析

在新建隧道下穿过程中, 重点分析地铁 4 号线车

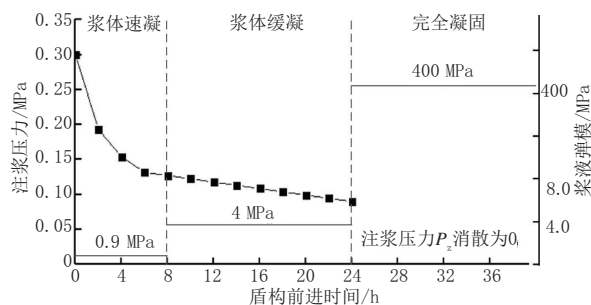


图7 注浆体基本物理力学参数

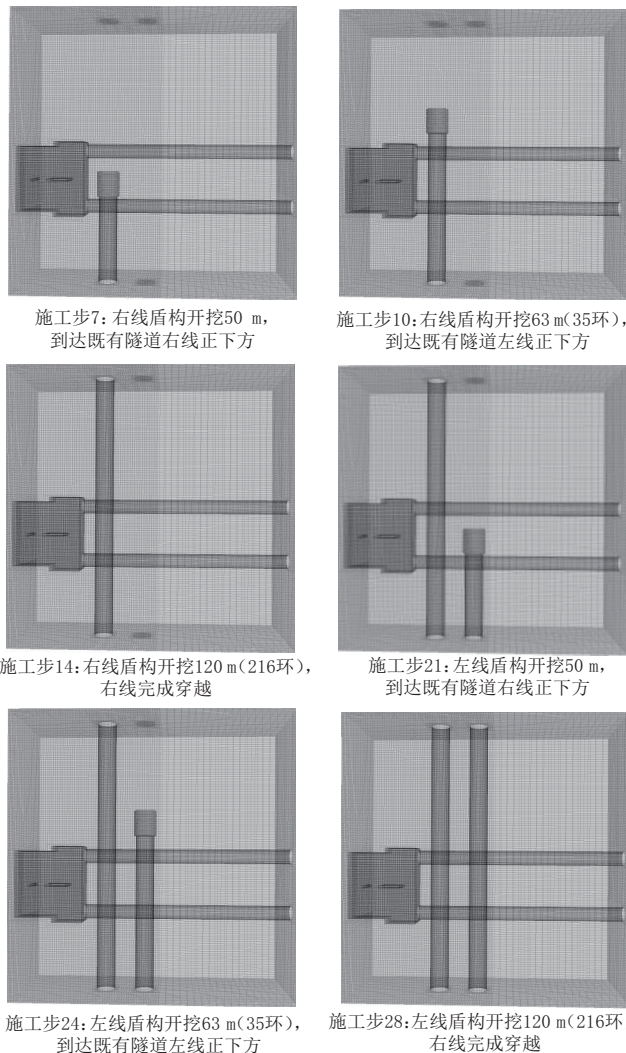


图8 盾构掘进施工步选取

站及区间隧道的变形。提取盾构掘进各施工步的变形数据, 绘制其竖向变形随掘进演化的曲线, 所有竖向位移曲线图, 均以向上位移为正值(隆起), 向下位移为负值(沉降)。图中纵坐标直接显示沉降绝对值, 其物理含义为结构下沉量。如图 9、图 10 所示。

由于地下连续墙的保护作用, 地铁 4 号线车站底板的变形是极其微小。整体表现为靠近隧道开挖一侧的车站沉降较大, 最大沉降量为 -1.02 mm; 远离隧道开挖一侧的车站沉降较小, 最小沉降为 -0.35 mm。快线右线的掘进对既有车站的变形影响较大, 而快

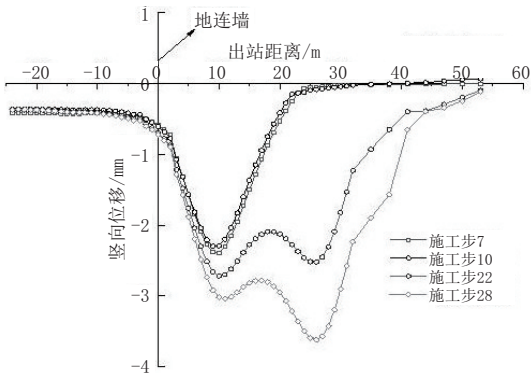


图9 地铁4号线右线(含车站部分)竖向位移

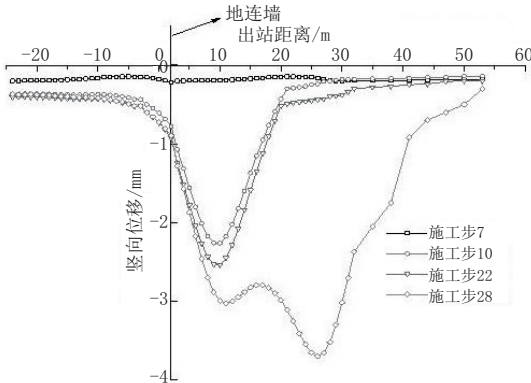


图10 地铁4号线左线(含车站部分)竖向位移

线左线由于距离既有车站较远,在左线开挖过程中,既有车站的变形几乎不受影响。

随着盾构机的推进,地铁4号线隧道左线和右线的竖向沉降逐渐增大,且沉降范围也随之扩大。曲线形态从初始的“V字型”逐步演变为“W字型”。当盾构机沿快线左线掘进并驶离下穿段时,地铁4号线区间隧道部分的沉降范围扩大至原来的两倍,呈现明显的双波峰特征。具体来看,地铁4号线右线的最大沉降出现在施工步28,沉降值为-3.69 mm。左线的最大沉降也出现在施工步28,沉降值为-3.76 mm。数值模拟结果表明,既有隧道左线和右线的最大沉降均小于滨海快线工程要求的微扰动控制指标(5 mm),显示盾构施工对既有隧道的扰动在可控范围内。

作为车站基坑支护的地连墙,在盾构下穿施工过程中的作用不可忽略。因此,在假定无地连墙情况下,对盾构下穿施工过程进行类似的数值模拟分析,定量探究地连墙的保护效果,二者对比情况如图11所示。

地铁4号线车站及区间隧道的变形趋势整体一致,均呈现为随着隧道双线的掘进,既有隧道由“V型”变为“W型”。由于地连墙的阻隔和对地层位移的牵制作用,既有车站的沉降相较于无地连墙作用

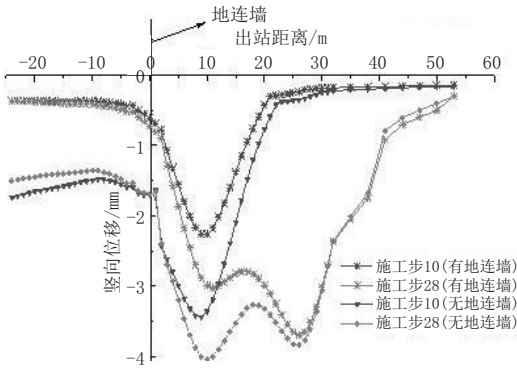


图11 地连墙对地铁4号线左线沉降的影响

的情况沉降减少1.2 mm,降幅达70%。靠近车站一侧的既有隧道的最大竖向变形减少1.12 mm,降幅达28%。对远离地连墙一侧的隧道变形几乎没有影响。

究其原因:地下连续墙通过与土体的相互作用一定程度上牵制了既有地下结构的向下运动,使沉降槽的形态从对称沉降转化为非对称沉降,同时有效减小既有地下结构的最大沉降。牵制效应在地下连续墙所处位置最为明显,随距离增大逐渐衰减直至消失。

4 现场监测与分析

4.1 实测数据分析

滨海快线福东区间右线从2023年3月19日—4月3日(历时16 d)下穿地铁4号线;左线从2023年4月19日—5月2日(历时16 d)下穿地铁4号线。下穿施工期间,对地铁4号线区间隧道及车站的沉降实施自动化监测。选用徕卡TS30自动测量机器人组建自动化监测系统,其测角精度为0.5″,测距精度为0.6 mm±1 ppm。监测频率为2次/d。具体监测范围包括YDK29+716~YDK29+800、ZDK29+716~ZDK29+800。取约5环间距布设1个监测断面,洞门处加密1个断面设置,取3环间距布设。既有隧道和车站部分左右线各布设17个监测断面,如图12所示。

隧道区间管片结构的监测断面内布设5个监测点,分别为拱腰2个监测点、拱顶1个监测点和道床2个监测点。

根据现场实测数据,绘制各阶段结束后既有地铁4号线隧道和车站的变形规律,如图13、图14所示。

由图13、14可知,既有地铁4号线左、右线隧道的拱顶竖向位移,在新建隧道右线开挖后呈现出明

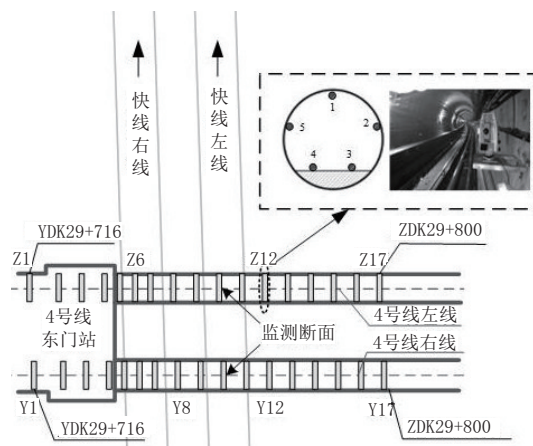


图12 测点布设

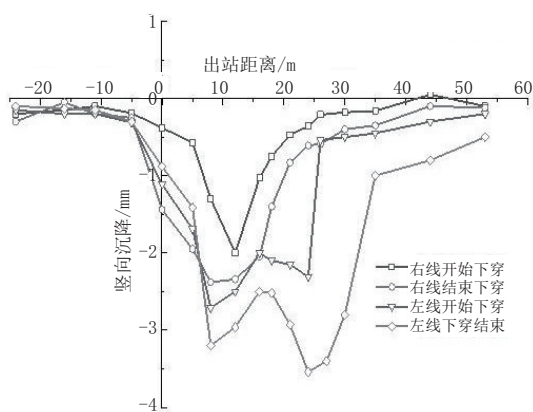


图13 地铁4号线右线(含车站部分)竖向位移

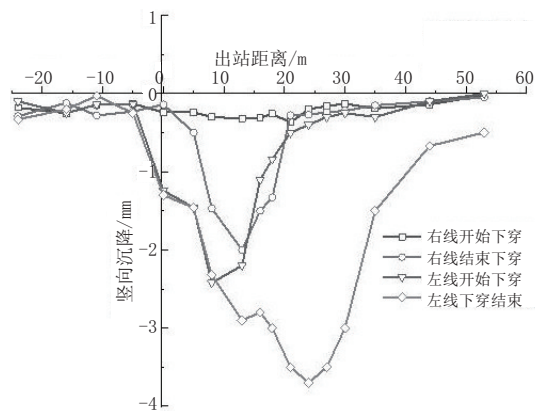


图14 地铁4号线左线(含车站部分)竖向位移

显的“W”型分布。最大沉降出现在既有隧道正下方,隧道掘进结束后达到峰值。右线的最大沉降值为-3.74 mm,左线的最大沉降值为-3.54 mm,既有隧道变形的规律和数值结果基本一致。此外,距离新旧隧道平面交点约20 m范围内($2Dt$, Dt 为新建隧道直径)的既有隧道拱顶竖向位移受新建隧道开挖的影响较大,但20 m以外的隧道几乎不受掘进的影响。

4.2 对比验证

既有地铁4号线车站及区间隧道的竖向位移对

比,如图15所示。数值模拟的最大沉降值和实测数据较为接近,变化规律基本一致。随着施工的推进,既有隧道的竖向位移曲线,均呈现出明显的双波峰形状。由于注浆的作用,影响范围均在新建隧道的2倍洞径范围内。地铁4号线左、右线隧道竖向位移在新建隧道下穿结束后,于既有隧道的正下方达到最大值,实测结果分别为-3.54、-3.74 mm,数值模拟结果为-3.76、-3.69 mm。对数值模拟结果与实测数据进行误差分析:决定系数(R^2)为0.958(左线),0.936(右线),均接近1,表明模拟结果具有较高的预测精度。

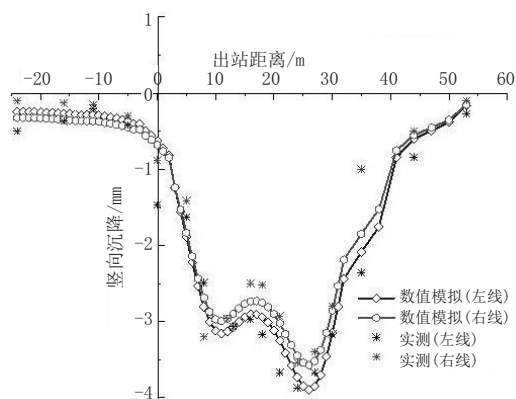


图15 地铁4号线隧道位移对比

5 结论

综合考虑机-土相互作用、盾构荷载及同步注浆硬化与压力消散等因素,对滨海快线福东区间隧道下穿地铁4号线工程的掘进施工全过程展开精细化数值模拟,探究邻近车站条件下盾构隧道近接下穿的施工力学特性,得出以下结论。

(1)数值模拟结果表明,地铁4号线车站及区间隧道以沉降变形为主,随着滨海快线左、右线盾构依次掘进,既有地铁4号线区间隧道部分沉降逐步增大,竖向变形由单线下穿时的“V型”演化为双线下穿完成后的“W型”。最大沉降均出现在交叉段正上方,左、右线对应沉降值分别为-3.76 mm和-3.69 mm。实测数据与数值模拟结果在变化规律上基本相符。

(2)地连墙对土体变形主要起阻隔和牵制作用,由于地连墙的作用,既有车站的沉降相较于无地连墙作用的情况沉降减少1.2 mm,降幅达70%。靠近地连墙一侧的既有隧道的最大竖向变形减少1.12 mm,降幅达28%。对远离地连墙一侧隧道的影响可忽略不计。

(3)在小净距、软硬交替地层中进行盾构近接下

穿施工时,应充分发挥既有地连墙的阻隔效应,将新建隧道轴线尽量布置于地连墙有效影响范围(约2倍洞径)内。此外,建议引入自动化监测与动态预警系统,根据实时沉降数据调整土仓压力与注浆参数,实现智能化施工控制。

参考文献:

[1] Ding Z, Zhang M B, Zhang X, et al. Theoretical analysis on the deformation of existing tunnel caused by under-crossing of large-diameter slurry shield considering construction factors [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 133: 104913.

[2] Liu B, Huang P G, Zhu S R, et al. Disturbing Effect of Shield Tunnel Down-Traversing Nearby Existing Metro Tunnel [C].//IEEE 2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2015.

[3] 白海卫,王剑晨,刘运亮,等.既有地下结构受下穿施工影响的力学响应与安全控制研究[J].岩土工程学报,2019,41(5):874-884.

[4] Fu J Y, Zhao N N, Qu Y, et al. Effects of twin tunnel undercrossing excavation on the operational high speed railway tunnel with ballastless track[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 124: 104470.

[5] 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.

[6] 杨荟斯,刘涛,缪红彬,等.盾构隧道近距离下穿对既有运营隧道影响[J].大连理工大学学报,2022,62(3):263-271.

[7] 路德春,宋涛,林庆涛,等.盾构下穿施工既有隧道变形机理数值模拟研究[J].防灾减灾工程学报,2025,45(3):485-500.

[8] 李本.区间盾构隧道下穿既有车站变形机理及变形控制研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2019.

[9] 张庆.隧道下穿既有地铁车站影响研究与车站预留下穿条件分析[J].中国高新科技,2024(5):130-132.

[10] 杨万精,王腾腾,来弘鹏,等.双线盾构近距下穿既有地铁地表位移规律研究[J].铁道工程学报,2021,38(7):66-73.

[11] 何占坤.盾构隧道下穿既有车站桩筏基础影响分析及施工控制——以杭州地铁5号线盾构隧道下穿杭州南站站房工程为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(增刊1):222-231.

[12] 沈宇鹏,张旺,蔡志勇,等.侧邻既有车站隧道开挖面不对称失稳特征研究[J].铁道工程学报,2023,40(7):80-85;92.

[13] 李雪,陈霖,赵卫星,等.暗挖隧道下穿既有地铁线路变形控制对比研究[J].建筑结构,2023,53(增刊2):2709-2714.

[14] 福建省地质工程研究院.福州至长乐机场城际铁路(F1线)岩土工程勘察报告[Z].2019.

[15] 杨滔.盾构隧道施工对紧邻既有有线变形影响的数值模拟与理论分析研究[D].福州:福州大学,2025.

[16] 李培楠,朱合华,李晓军,蒋曦.大断面异形盾构同步注浆两阶段复合扩散机制及压力时空分布模式[J].土木工程学报,2023,56(3):90-106.

(上接第292页)

报(自然科学版),2018,45(9):1-9.

[11] 郑史雄,周志祥.考虑剪力滞效应的长悬臂板有效宽度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(7):26-32.

[12] 汪劲丰,项贻强.基于多方法融合的长悬臂板安全评估[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(4):704-711.

[13] 唐亮,刘钊.长悬臂钢-混组合桥面板受力机理与设计方法[J].建筑结构学报,2021,42(增刊1):332-339.

[14] 吴刚,王景全.基于响应面法的长悬臂板参数敏感性分析[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):456-462.

[15] O' Brien E. J., Keogh D. L., O' Connor A. J. Bridge deck analysis under traffic loading by finite element and influence surface methods [J]. Computers & Structures, 2010, 88(9-10): 567-578.

[16] 韩艳,蔡春声.基于机器学习的悬臂板内力快速预测模型[J].计算力学学报,2024,41(1):120-127.

[17] Sawko F. The analysis of cantilever slabs for highway bridges under wheel loads[J]. Journal of Structural Engineering, 1968, 94 (ST5): 1265-1278.

[18] 林荃冰.横坡对超大悬臂预应力盖梁的受力影响[J].城市道桥与防洪,2024(10):95-98.

[19] Chen X., Aref A. J. Finite element analysis and design recommendations for long cantilevered bridge decks[J]. Engineering Structures, 2005, 27(11):1583-1594.

[20] 李永乐,廖海黎.风-车耦合作用下长悬臂板的动力响应[J].振动与冲击,2023,42(15):88-95.