

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202106014

潘涛. 软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 101-108.
PAN Tao. Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 101-108.

软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表 以及建筑物沉降的影响

潘 涛

(上海隧道工程有限公司, 上海 200000)

摘要: 研究盾构隧道施工对周围地面以及建筑物沉降造成的影响, 是软土地区盾构隧道安全施工和正常运营的基础课题。为了分析宁波轨道交通 5 号线同德路站—石碇站区间双线盾构隧道施工对周边地表和建筑物的影响, 本文在建立盾构隧道动态施工过程三维有限元模型的基础上, 基于地表以及建筑物沉降数值模拟结果与现场监测值的对比, 分析了隧道开挖对隧道周围地表沉降与建筑物沉降的影响。结果表明, 掘进完成时, 开挖方向沉降槽往上行线隧道方向偏移、呈现倒梯形形态, 横断面影响区域为距离双线隧道轴线中心小于 3 倍隧道直径; 上行线在下行线开挖后并不会增加地表沉降, 但增大了沉降槽宽度; 下行线到达前产生的沉降占最终累计沉降的 67%; 当盾构掘进面刚到达建筑物时、建筑物的倾斜方向与盾构掘进方向一致, 当盾构掘进面离开建筑物时、建筑物将沿着盾构掘进的反方向倾斜; 建筑物两侧沉降值较中部沉降值降低了 83%; 双线贯通后建筑物沉降呈“U”形分布, 最大沉降量发生在远离隧道一侧距建筑物中心 0.5 m 处。

关键词: 盾构隧道; 有限元模型; 地表沉降; 建筑物沉降

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0101-08

Influences of double-track shield tunnel construction on settlements of adjacent ground and buildings in a soft soil area

PAN Tao

(Shanghai Tunnel Engineering Co. Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: The influence of the shield tunnel construction on the adjacent grounds and buildings is a fundamental issue for the safe construction and regular service of the shield tunnel in the soft soil area. In order to investigate the influences of the double-track shield tunnel construction between the Tongde Road Station and the Shiqi Station of the Ningbo Metro Line 5 on the adjacent grounds and buildings, a dynamic 3D finite element model of shield tunneling is established. After comparing the simulated and monitored settlements of the ground surface and adjacent building, the influences of the tunnel construction on the adjacent ground surface and building are thereafter explored. The results show that when the excavation is completed, the subsidence tank deviates from the direction of the upward tunnel with an inverted trapezoidal shape, and the final cross-sectional influence area is less than 3 times the tunnel diameter from the center of the double-track tunnel axis. After the excavation of the ascending line, the surface settlement does not increase, but the width of the settlement groove increases. The settlement generated before the arrival of the downstream line accounts for 67% of the final cumulative settlement.

收稿日期: 2021-06-03; 修订日期: 2021-07-08

投稿网址: www.swdzcgdz.com

第一作者: 潘涛(1985-), 男, 高级工程师, 主要从事地下工程施工技术的研究工作。E-mail: pantao_03@163.com

The building inclines along the direction of shield tunneling as the shield reaches the building, while the building inclines along the opposite direction of shield tunneling as the shield leaves the building. The settlements at both sides of the building are reduced by 83%, compared with those at the middle part. After the two lines are connected, the settlements of the building shows a "U" shape distribution, and the maximum settlement occurring at the middle building is 0.5 m from the tunnel.

Keywords: shield tunnel; finite element model; ground surface settlement; building settlement

盾构隧道具有施工速度快、自动化程度高、地层适用性广等特点,是沿海软土地区进行地铁隧道施工的常用方式。通常使用实测方法和数值模拟方法研究盾构隧道施工引起的地面沉降问题与建筑物沉降问题。

对于盾构隧道施工引起的地面沉降问题,唐海玥等^[1]采用有限元软件 ABAQUS 模拟了地铁隧道盾构开挖诱发地表沉降的特征。王鹏等^[2]以武汉地铁三号线为例,结合数值模拟与现场监测资料,分析了盾构开挖引起的地表沉降。顾其波等^[3]分析了宁波软土地区由于盾构隧道施工引起的地表横向沉降。Cattoni 等^[4]结合参数分析与水-力耦合分析,研究了软黏土中盾构隧道开挖时地面位移随时间的变化过程与掘进速度的影响。Shan 等^[5]研究了由隧道盾构掘进面推进引起的临近路堤差异沉降以及动应力分布。丁智等^[6]总结了隧道-邻近建筑物相对位置不同对地表沉降型式的影响。

对于盾构隧道施工引起的建筑物沉降问题,王辉等^[7]通过建立参数化模型,分析了相对位置不同时新建隧道对近接建筑物变形的影响。孙杰等^[8]通过建立隧道掘进三维数值分析模型,研究了不同空间位置双线隧道穿越多座建筑物时的建筑物力学性状变化。林志等^[9]结合数值计算和现场监测,分析了隧道开挖对邻近学校办公楼基础沉降和横向倾斜的影响。关永平^[10]通过建立隧道施工二维有限元分析模型,研究了隧道施工方案、建筑物水平间距、建筑物基础埋深、场地土层参数对近接既有建筑物变形的影响;魏纲等^[11]基于经验公式、弹性地基梁原理、有限元模拟结果,研究了浅埋暗挖隧道施工引起的建筑物沉降预测方法。戴轩等^[12]结合有限元数值模拟结果、建筑物变形实测结果、土体小应变硬化特性,研究了地铁盾构隧道正交下穿砌体结构时盾构侧穿施工引发的建筑物纵向挠曲。郭靖等^[13]基于广义层间位移谱,研究了隧道对不同位置地表建筑结构层间位移及其高度分布的影响。陈仁朋等^[14]通过建立有限

元数值分析模型,研究了地铁盾构隧道正交下穿砌体结构时墙体主拉应变大小、主拉应变分布、实测裂缝分布之间的关系。张运强等^[15]建立了基于 Peck 公式的建筑物风险区计算模型,分析了隧道直径、基础埋深、地层损失率等因素对建筑物风险区的影响。

此外,对于盾构隧道施工时的建筑物保护问题,唐海玥等^[1]采用有限元软件 ABAQUS,分析了城市地铁隧道盾构开挖时施工参数与建筑物刚度特性对古建筑地表沉降的影响。Fan 等^[16]比较系统地研究了临近地铁隧道施工时的砖木结构历史建筑群保护问题。Cui 等^[17]分析了全风化花岗岩和软土沉积物界面处盾构隧道施工时的临近建筑物保护与施工参数优化问题。对于隧道施工对其它建筑物的影响,Li 等^[18]结合随机介质理论解与数值模拟,研究了马蹄形隧道开挖施工引起的地铁车站局部沉降。Zheng 等^[19]使用经验公式与三维有限元数值模拟结果,研究了临近隧道施工对既有地铁车站沉降的影响。于德海等^[20]根据现场监测数据与三维有限元模拟结果,分析了盾构隧道施工对铁路桥沉降造成的影响。

由于软土地区地层松软、施工环境条件通常比较复杂,盾构隧道施工对附近地表与建筑物影响仍然是亟待研究的问题。本文拟以宁波轨道交通 5 号线同德路站—石碶站区间隧道工程为背景,采用有限元软件 ABAQUS 建立盾构隧道开挖的三维数值分析模型,将数值模拟结果与现场监测数据进行对比,分析盾构施工引起的地层沉降变形与附近建筑物的沉降,研究成果对分析软土地区盾构隧道施工的环境影响具有一定的参考价值。

1 数值模拟模型

1.1 工程背景

本次研究的背景工程是浙江省宁波轨道交通 5 号线一期土建工程中的同德路站—石碶站区间(简称同-石区间)盾构隧道。该工程于 2021 年 5 月 31 日全线贯通,预计 2021 年底开通运营。

同-石区间隧道设计为单洞双线, 上行线区间全长 1 184.090 m, 最小曲线半径 700 m, 下行线区间区间全长 1 195.882 m, 最小曲线半径 700 m, 其中上行线于 2020 年 11 月 2 日推进完毕、下行线于 2020 年 12 月 19 日推进完毕; 隧道顶部埋深 8.44 ~ 17.86 m, 区间隧道衬砌环均外径 6 200 mm, 内径 5 500 mm, 厚 350 mm, 标准环宽 1.5 m, 错缝拼装。本段区间穿越地层以淤泥质黏土、黏土、粉质黏土、砂质粉土层为主, 见图 1。图中分别标出了锥头阻力静探曲线(红色)和侧阻力静探曲线(蓝色)。

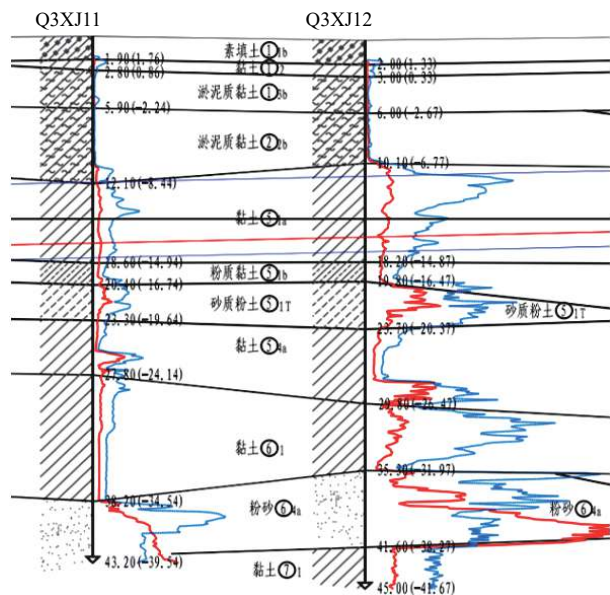


图 1 研究区段的土层分布

Fig. 1 Soil distributions in the study area

1.2 模型尺寸及单元网格

选取同-石区间起始段 Q3XJ11 ~ Q3XJ12 区段为三维隧道掘进开挖模拟对象, 两隧道中心距离为 16 m。依据场地地层结构, 地层在纵向与横向均有不同程度的变化。为简化计算, 数值模拟时土层模型考虑为均匀层状土层模型, 沿纵向保持不变。

地层模型尺寸确定时, 基于隧道洞径来推算影响范围, 并且考虑边界效应的影响。盾构隧道内径 5.5 m、外径 6.2 m, 每一环衬砌宽度 1.5 m, 隧道埋深 10.6 m。在使用有限元软件建立隧道盾构模型时, 土层模型范围一般取隧道直径的 3 ~ 5 倍, 取 3 倍宽度时边界效应对隧道的影响在 10% 以下, 而 5 倍宽度时影响为 3% 以下。横向以隧道边缘向外扩 30 m 为依据确定地层模型尺寸。因此, 本文地层模型 X、Y、Z 向的尺寸分别确定为 80, 90, 45 m, X 代表横向, Y 代表掘进方向, Z 代表深度方向。

图 2 为所建立的三维隧道盾构开挖有限元模型。模型纵向位移取隆起为正值、沉降为负值。模型四周表面限制其法向位移、底面限制其 X、Y、Z 方向位移。模型网格划分时加密了隧道周围部分的网格, 以八节点线性六面体减缩单元作为土体单元、八结点线性六面体非协调单元作为注浆以及衬砌部分的单元、四结点曲面通用有限膜应变壳单元作为盾壳部分的单元。对隧道开挖进行双线模拟, 上行线先掘进、下行线跟进掘进。

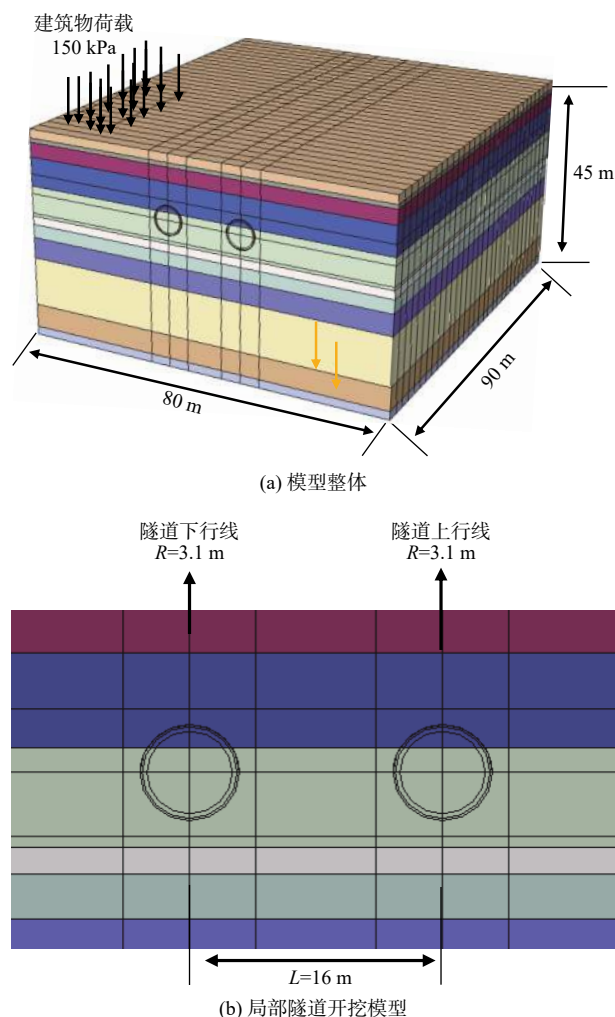


图 2 三维隧道开挖模型

Fig. 2 3D tunnel excavation model

1.3 材料参数

有限元建模过程中依据 Mohr-Coulomb 准则来输入各层土体材料物理力学参数。本文研究区段土层相关参数见表 1。盾构机盾壳材料为钢, 衬砌材料为 C50 混凝土, 相关参数见表 2。

建筑物采用表面荷载方式加在模型上部, 表面荷载值取自规范值 150 kPa、分布如图 2 所示。基于数

表 1 同-石区间隧道影响范围内的土层物理力学性质参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers in the affected area of the Tong-Shi tunnel

土层编号与名称	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
①1b素填土	2.00	8.00	15.00	8.0	0.33
①2黏土	1.94	20.90	14.60	9.9	0.32
①3b淤泥质黏土	1.74	11.20	11.20	23.4	0.36
②2b淤泥质黏土	1.73	11.04	10.47	9.0	0.38
⑤1a黏土	1.93	37.41	14.34	18.6	0.31
⑤1b粉质黏土	1.91	29.30	13.40	17.0	0.31
⑤1T砂质粉土	1.93	3.00	30.20	40.0	0.24
⑤4a黏土	1.88	22.90	11.40	26.4	0.32
⑥1黏土	1.93	42.70	14.30	35.5	0.31
⑥4a粉砂	2.02	3.50	31.20	34.4	0.30
⑦1黏土	1.94	37.60	15.37	31.5	0.32

表 2 同-石区间隧道材料参数

Table 2 Material parameters of the Tong-shi tunnel

材料类型	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
衬砌管片	2.50	34 500	0.33
注浆层	1.80	1	0.42
盾壳	7.85	206 000	0.22

值模拟中建筑物的模拟方式,本文数值模拟的建筑物沉降值指建筑物周围地表的沉降值。

1.4 盾构开挖过程

盾构机的长度取 8 环隧道长度(12 m),每次开挖 1 环(1.5 m)土体,模型中隧道待开挖环数总计 120 环(90 m),其中上行线 60 环、下行线 60 环。在开挖分析步中通过杀死土体单元的方法来实现盾构掘进面的推进,盾构机动态开挖过程如图 3。

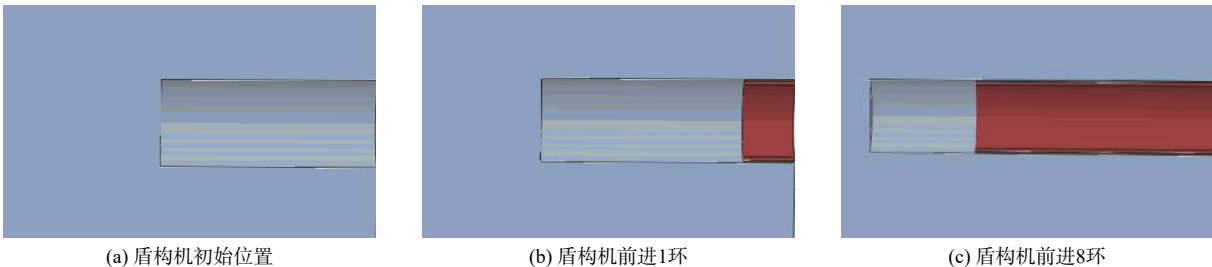


图 3 盾构开挖过程

Fig. 3 Shield excavation process

2 隧道施工对地表沉降的影响

2.1 地层变形特征

上行线掘进完成(第一工况)以及下行线掘进完成时(第二工况)的隧道竖向位移等值线图如图 4 所示。

从图 4 可以看出,上行线掘进完成时(第一工况),地表横向沉降槽主要影响区域为隧道直径 $2D$ (12.4 m) 范围(D 为隧道直径)。由于土体刚挖通,盾构机还未吊出,掘进面区域地表沉降不明显,为 6 mm,但掘进面后方隧道地表的沉降值逐步增大,在模型边缘处达到峰值,为 17 mm;下行线掘进完成时(第二工况),地表横向沉降槽进一步延长、在距离双线隧道轴线中心距离 18 m 范围内、小于 $3D$ (18.6 m);开挖方向地表横向沉降槽往上行线隧道方向偏移、关于两隧道中心线呈非对称分布,这是由于上行线隧道周围的土体在下行线开挖后受到了二次扰动;开挖面后区域土体逐渐趋于稳定,上行线边界处出现最大地表沉降,为 17 mm。

由图 4 还可以看出,隧道上部地表在下行线开挖后并不会增加地表沉降值、而是增大了地表沉降槽的宽度,隧道周围地表最大沉降值主要受上行线(即先

开挖一侧)隧道的影响。

2.2 地表沉降特征

隧道周围地表沉降监测点纵向(即盾构机开挖方向)的布置间距为 5 m,并且建筑物沉降监测点布置在建筑物周围地表,故其监测值指的是建筑物附近地表沉降,监测布置图如图 5 所示。

图 6 为上行线 900 环与 905 环地表沉降随时间变化的监测结果和数值模拟结果对比。由于前期监测数据缺失,故监测数据从上行线掘进完成时开始统计。由图 6 可知,上行线盾构完成后监测点 SD900 与 SD905 均产生了一定的沉降,且沉降速度较快;下行线盾构到达监测点 SD900 与 SD905 时,2 个监测点均产生了一定程度的隆起;下行线盾构完成时监测点 SD900 与 SD905 的沉降值趋于稳定;下行线通过时产生的沉降平均值为 9.17 mm、占总沉降的 37%,表明隧道周围的地表沉降主要受上行线隧道开挖的影响,后开挖隧道仅对其产生了一定程度的二次扰动。

由图 6 还可以看出,监测值与数值模拟结果的变化规律基本一致,这验证了计算模型的可靠性;但

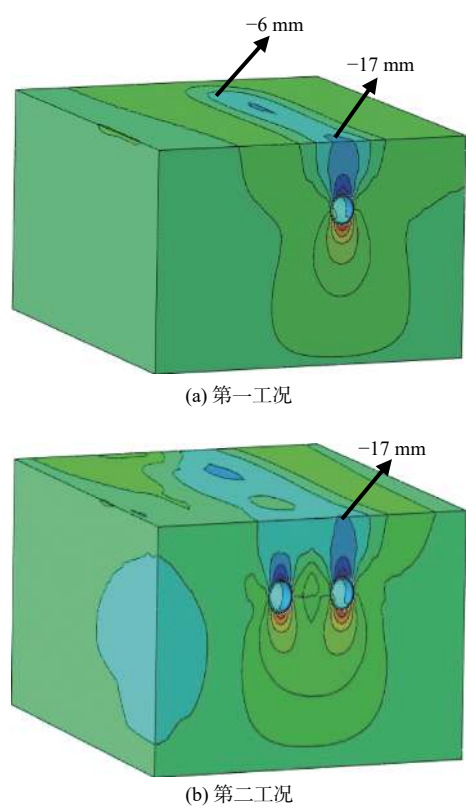


图 4 不同工况下的隧道竖向位移等值线图

Fig. 4 Contour map of the tunnel vertical displacement under different working conditions

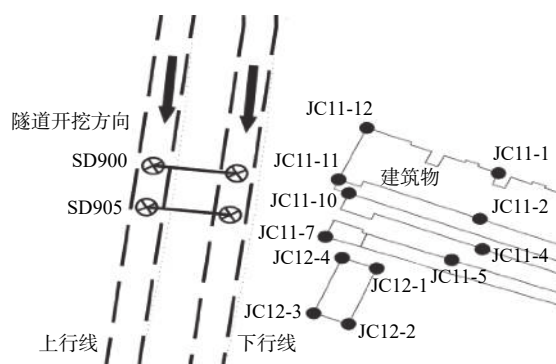


图 5 隧道监测点布置图

Fig. 5 Layout of the tunnel monitoring points

2 个监测点数值模拟的最终沉降平均值小于监测平均值的 51.4%, 可能的原因有: (1)隧道上部建筑物只模拟出了一小部分, 而实际隧道上部建筑物较为密集; (2)数值模拟中土层模型为均匀层状模型, 而实际土层在掘进方向会发生动态变化。

3 隧道施工对建筑物沉降的影响

3.1 不同时间历程下的建筑物沉降特征

图 7 为建筑物沉降随时间变化的监测结果和数值

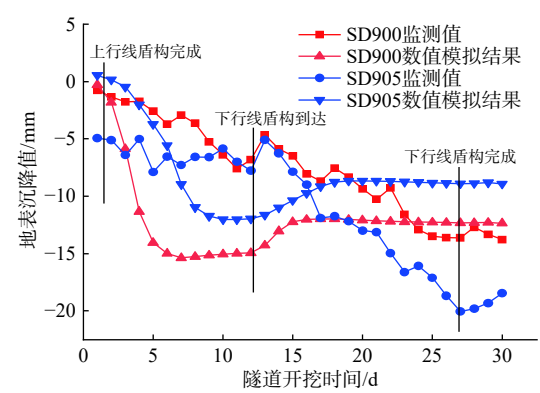
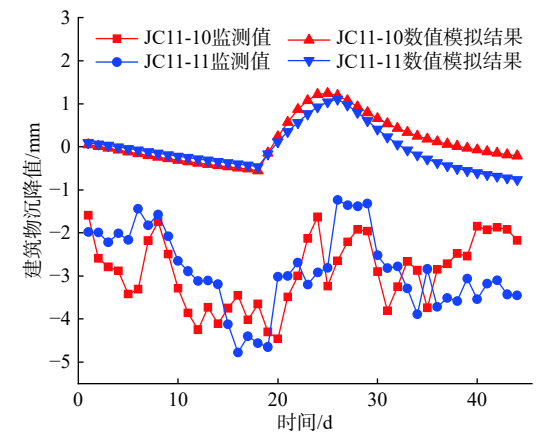


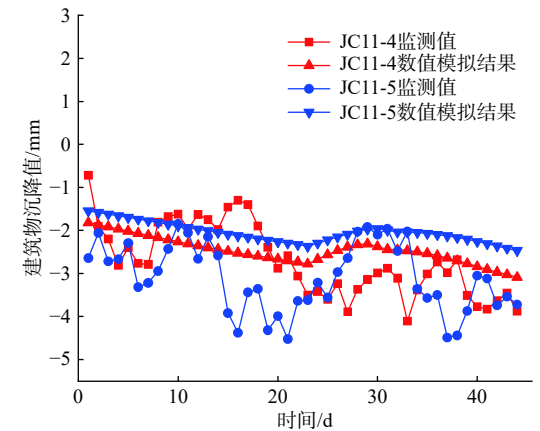
图 6 地表沉降历时曲线

Fig. 6 Duration curve of ground subsidence

模拟结果。由图 7 可知, 当建筑物监测点周围土体未被开挖时, 建筑物监测点表现为沉降状态; 当下行盾构到达监测点时, 测点逐渐开始隆起, 这是由于开挖导致的应力释放引起的。通过临近隧道一侧与远离隧道一侧建筑物沉降平均值的对比可知, 临近隧道一侧建筑物的沉降大小要大于远离隧道一侧建筑物的



(a) 临近隧道一侧建筑物



(b) 远离隧道一侧建筑物

图 7 不同位置建筑物沉降历时曲线

Fig. 7 Duration curve of building settlement

沉降大小;在下行线掘进后,不同建筑物测点沉降值逐渐趋于稳定。建筑物的最大沉降值测点为监测点 JC11-11,沉降量为 4.89 mm;通过计算可知,该测点沉降值的 67% 由上行线(即先开挖一侧)隧道施工所积累。因此,双线盾构隧道施工过程中,临近隧道一侧的建筑物沉降值要远大于远离隧道一侧建筑物;建筑物沉降值主要由先开挖一侧隧道施工所提供。

由图 7 还可以看出,远离隧道一侧建筑物沉降模拟结果与实测结果基本一致,临近隧道一侧建筑物沉降模拟结果与实测结果存在较大差异,相对误差平均值为 212%。原因可能是在数值模拟中隧道上部建筑物只模拟出了一小部分、并未模拟出全部的地表建筑物。同时,临近隧道一侧建筑物由于受到隧道开挖的应力释放而产生了隆起、使其数值模拟所得沉降值明显小于监测值。

3.2 不同工况下的建筑物沉降特征

选取不同的下行线盾构机与建筑物相对位置进行了数值模拟,以研究区段建筑物沉降监测数据为依据来验证有限元模型的正确性。定义下行线盾构机与建筑物相对位置 β 为盾构开挖面与建筑物边缘监测点 JC11-12 沿隧道方向距离与建筑物沿隧道方向的长度之比,具体工况如表 3 所示。

表 3 计算工况
Table 3 Calculation conditions

工况	β	盾构机到达监测点	下行线盾构机工作进程
一	-	-	盾构机开始工作
二	0.0	JC11-12	盾构到达建筑物边缘
三	0.5	JC11-7	盾构到达建筑物中部
四	1.0	JC12-3	盾构离开建筑物

图 8、图 9 为不同工况下建筑物各监测点的沉降监测结果和数值模拟结果。

由图 8 可以看出,下行线盾构开始工作时(工况一),上行线盾构刚好贯通,建筑物靠近上行线掘进面一侧的监测点 JC12-3 处于隆起状态、隆起值为 1.5 mm,上行线盾尾向后建筑物沉降较大,边缘处监测点 JC11-12 沉降达到最大、为 4.98 mm,此时,建筑物将产生不均匀沉降、并且往盾构掘进的反方向倾斜;当下行线盾构刚好到达建筑物(工况二)时,建筑物与盾构机接触区域的监测点 JC12-3 处由于应力释放而产生了大量隆起(隆起值为 1.65 mm),盾构掘进面前方区域由于下行线盾构未到达、处于沉降状态,建筑物中间区域监测点 JC11-7 处沉降值最大、为 3.87 mm,此时,由于不均匀沉降,建筑物将沿着盾构掘进方向倾

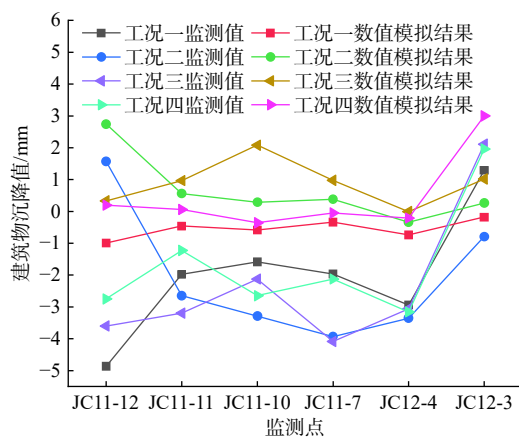


图 8 临近隧道一侧建筑物各工况沉降

Fig. 8 Settlements of building sides near the tunnel under various working conditions

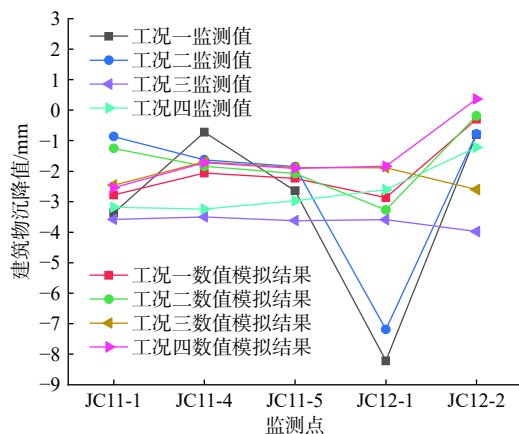


图 9 远离隧道一侧建筑物各工况沉降

Fig. 9 Settlements of building sides far away from the tunnel under various working conditions

斜;当下行线盾构到达建筑物中部(工况三)时,盾尾向后区域的建筑物监测点较第二工况产生了大幅度的沉降,边缘处监测点 JC11-12 沉降值最大、为 3.97 mm,建筑物中部区域监测点的沉降值较第二工况降低了 21.0%;当下行线盾构离开建筑物(工况四)时,建筑物沿盾构掘进方向边缘处监测点 JC12-3 隆起值最大、为 2.1 mm,较工况一增加了 21.4%,此时,由于不均匀沉降,建筑物将沿着盾构掘进的反方向倾斜。由以上分析可知,由于盾构开挖工况的不同,建筑物各位置表现出隆起或沉降,靠近盾构掘进面一侧的建筑物表现出隆起、远离盾构面一侧的表现出沉降。建筑物的倾斜表现出不同方向:当盾构刚到达建筑物时、建筑物将沿着盾构掘进方向倾斜,当盾构离开建筑物时、建筑物将沿着盾构掘进的相反方向发生倾斜。

由图 9 可以看出,远离隧道一侧建筑物各监测点在盾构开挖各工况下的沉降趋势与临近隧道一侧建

建筑物各监测点的沉降趋势基本一致,但临近隧道一侧监测点受盾构开挖影响的程度较低,各监测点沉降值变化幅度不大,这与上节结论基本一致。

结合图 8 和图 9 可以看出,建筑物各监测点的数值模拟结果与监测数据趋势变化基本一致,但由于数值模拟并未模拟出所有建筑物、数值模拟结果较监测数据普遍偏低。

3.3 不同位置下的建筑物沉降特征

图 10 为双线隧道掘进完成时不同水平位置下建筑物沉降值的监测结果和数值模拟结果,图中横坐标的正值表示靠近隧道一侧建筑物监测点距建筑物中心距离、负值表示远离隧道一侧建筑物监测点距建筑物中心距离。

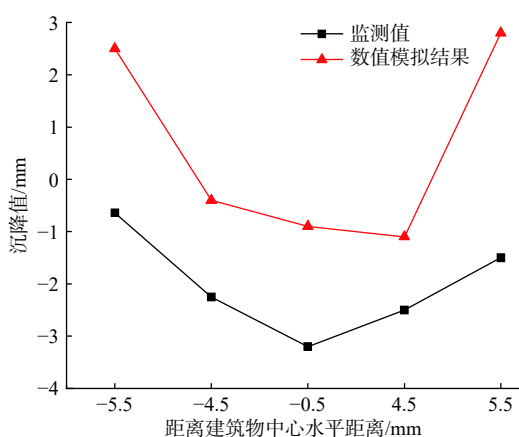


图 10 不同位置下的建筑物沉降

Fig. 10 Building settlement at various locations

由图 10 可以看出,双线隧道掘进完成时建筑物两侧沉降值较中部沉降值降低了 83%。建筑物沉降呈“U”形分布,最大沉降量(3.12 mm)发生在远离隧道一侧距建筑物中心 0.5 m 处。对于距建筑物中心相同距离的建筑物两侧,靠近隧道一侧的沉降平均值比远离隧道一侧约高 55%,说明靠近隧道一侧建筑物受到的扰动要高于远离隧道一侧。

由图 10 还可以看出,建筑物各水平位置的数值模拟结果与监测数据变化趋势基本一致,验证了模型的正确性,但具体沉降值有一定差异,这与模型中的建筑物荷载分布与实际情况存在差异有关。

4 结论

(1) 软土地区双线区间盾构隧道掘进完成时,地表横向沉降主要影响区域为距离隧道轴线中心距离 $3D$ (D 为隧道直径) 范围,地表沉降主要受先开挖隧道的

(2) 双线区间盾构隧道掘进过程中,临近隧道一侧建筑物的沉降远大于远离隧道一侧的建筑物,建筑物沉降值主要由先施工隧道一侧引起。

(3) 建筑物靠近掘进面一侧表现为隆起、远离掘进面一侧表现为沉降。盾构掘进面接近建筑物时,建筑物倾斜方向与盾构掘进方向一致;掘进面离开建筑物时,建筑物沿盾构掘进相反方向倾斜。

(4) 双线区间盾构隧道掘进过程中,建筑物两侧沉降值较中部沉降值降低约 83%;隧道贯通后,建筑物沉降呈“U”形分布,最大沉降发生在远离隧道一侧距建筑物中心 0.5 m 处。

参考文献 (References) :

- [1] 唐海玥, 靳炳强. 城市地铁隧道施工对古建筑沉降的影响研究[J]. 公路工程, 2020, 45(3): 149 - 152. [TANG Haiyue, JIN Bingqiang. Study on numerical simulation of ground settlement induced by shield tunnel construction[J]. Highway Engineering, 2020, 45(3): 149 - 152. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王鹏, 周传波, 刘亚辉, 等. 武汉地铁三号线土层盾构开挖引起的地表沉降研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 75 - 78. [WANG Peng, ZHOU Chuanbo, LIU Yahui, et al. A study of land subsidence in the subway shield tunnel excavation in soil strata in Wuhan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 75 - 78. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 顾其波, 郑荣跃, 杨芬, 等. 宁波软土盾构隧道施工地表沉降分析[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(1): 85 - 93. [GU Qibo, ZHENG Rongyue, YANG Fen, et al. An analysis of the surface settlement in the shield construction on the Ningbo urban rail transit[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 85 - 93. (in Chinese with English abstract)]
- [4] CATTONI E, MIRIANO C, BOCO L, et al. Time-dependent ground movements induced by shield tunneling in soft clay: a parametric study[J]. Acta Geotechnica, 2016, 11(6): 1385 - 1399.
- [5] SHAN Y, ZHOU S H, SHU Y. Differential settlement and soil dynamic stress of a culvert-embankment transition zone due to an adjacent shield tunnel construction[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(7): 2325 - 2333.
- [6] 丁智, 朱少杰, 秦建设, 等. 邻近建筑物盾构隧道开挖引起的地表沉降预测研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 77 - 83. [DING Zhi, ZHU Shaojie, QIN Jianshe, et al. Prediction and analysis of surface settlement induced by shield tunnelling adjacent to buildings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(4): 77 - 83. (in Chinese

- with English abstract)]
- [7] 王辉, 蒋成, 郑朋强, 等. 城市隧道近接建筑施工的相互影响规律研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(4): 27 – 32. [WANG Hui, JIANG Cheng, ZHENG Pengqiang, et al. Analysis on interaction influence between urban tunneling and adjacent buildings[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(4): 27 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 孙杰, 武科, 郑扬, 等. 城市地铁TBM隧道掘进诱发既有建筑物变形的空间属性效应[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(1): 32 – 38. [SUN Jie, WU Ke, ZHENG Yang, et al. Influence of TBM tunnel excavation at different positions on buildings[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(1): 32 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 林志, 范国宇, 冯森. 地铁隧道施工对邻近建筑物影响分析[J]. 兰州工业学院学报, 2020, 27(6): 12 – 16. [LIN Zhi, FAN Guoyu, FENG Sen. Influence analysis of subway tunnel construction on adjacent buildings[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2020, 27(6): 12 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 关永平. 隧道开挖对周边建筑物变形的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(6): 227 – 232. [GUAN Yongping. Impacts of tunnel excavation on deformation of surrounding building[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, 15(6): 227 – 232. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 魏纲, 姜婉青. 浅埋暗挖隧道引起建筑物沉降的预测方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(23): 107 – 112. [WEI Gang, JIANG Wanqing. Prediction method for settlement of buildings caused by shallow buried tunneling[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(23): 107 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 戴轩, 郭旺, 程雪松, 等. 盾构隧道平行侧穿诱发的建筑纵向沉降实测与模拟分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(1): 233 – 244. [DAI Xuan, GUO Wang, CHENG Xuesong, et al. Field measurement and numerical analysis for evaluating longitudinal settlement induced by shield tunneling parallel to building[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 233 – 244. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 郭靖, 陈健云, 余流. 隧道对地表临近既有建筑物层间位移影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(3): 765 – 772. [GUO Jing, CHEN Jianyun, YU Liu. Influence of tunnel on inter-story drift of adjacent structures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(3): 765 – 772. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 陈仁朋, 曾巍, 吴怀娜, 等. 盾构隧道下穿引起砌体结构建筑沉降损伤实例研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2301 – 2307. [CHEN Renpeng, ZENG Wei, WU Huaina, et al. Case study of tunneling-induced settlement and damage of masonry buildings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(12): 2301 – 2307. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 张运强, 曹文贵, 周苏华. 盾构隧道施工对邻近建筑物破坏风险初步评估[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(2): 119 – 124. [ZHANG Yunqiang, CAO Wengui, ZHOU Suhua. Preliminary risk assessment of shield tunnelling-included damage to adjacent buildings[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(2): 119 – 124. (in Chinese with English abstract)]
- [16] FAN F, CHEN J J, WANG J H. Protection of historical buildings in metro line construction: a case study in Shanghai, China[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2018, 23(4): 490 – 504.
- [17] CUI Q L, WU H N, SHEN S L, et al. Protection of neighbour buildings due to construction of shield tunnel in mixed ground with sand over weathered granite[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(6): 1 – 11.
- [18] LI Y, ZHOU G Y, TANG C A, et al. Influence of undercrossing tunnel excavation on the settlement of a metro station in Dalian[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 4673 – 4687.
- [19] ZHENG Y, WU K, SUN J, et al. Study on the influence of close distance construction of urban tunnel on the existing station[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021: 1 – 16.
- [20] 于德海, 舒娇娇, 秦凯凯. 盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 148 – 152. [YU Dehai, SHU Jiaojiao, QIN Kaikai. An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 148 – 152. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞