

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.172



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



南通地铁盾构下穿既有建筑诱发基础沉降分析

张斌¹, 王瑞², 汪优²

(1. 中铁(上海)投资集团有限公司, 上海 200126; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075)

摘要:针对盾构机下穿既有建筑问题,以南通地铁1号线环城东路站至中级人民法院站盾构区间下穿森大蒂花苑老旧居民区为研究对象,基于现场沉降监测,进行盾构施工对既有邻近建筑基础沉降的影响分析,针对盾构隧道下穿该老旧居民区进行数值模拟,综合考虑上部建筑荷载及盾构施工对围岩的扰动,对建筑物基础沉降进行分析。结果表明:盾构机在高富水砂土、粉土中掘进时,由于对地层的扰动和孔隙水消散等原因,易使机头扭转,造成掘进不稳定,最终引起地表沉降;而通过设置合理的土压力值,保持掘进面平衡,尽量使盾构机平稳通过,同时做好注浆、衬砌与地层间缝隙填充等工作,能够有效减小盾构引起的地表沉降。

关键词:盾构隧道;地表沉降;基础沉降;邻近建筑;数值模拟

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)03-0024-10

Analysis of foundation settlement induced by shield construction of Nantong metro underpassing existing buildings

ZHANG Bin¹, WANG Rui², WANG You²

(1. China Railway (Shanghai) Investment Group Co., Ltd., Shanghai 200126, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, P. R. China)

Abstract: In response to the problem of shields that underpass the existing buildings, the Nantong Metro Line 1 interval, from the East Huancheng Road Station to the Intermediate People's Court Station, which underpasses the old residential area of the Community Sendadi-Huayuan, was taken as the research case history. Based on the site settlement monitoring data, the impact of shield tunnel construction on the settlement of the adjacent buildings foundations was analyzed. Numerical simulations, taking into account the upper building load and the shield construction disturbance to the surrounding rock, were performed. The pattern of building foundation settlement was summarized. The results show that when the shield machine is tunneling in highly water-rich sandy soil and chalky soil, the head of the shield machine is prone to twisting due to soil disturbance and the dissipation of pore water, which causes instability in the excavation process and eventually results in surface

收稿日期:2021-04-20

基金项目:国家自然科学基金(51778633、51308552);2020年中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(序号41、243)

作者简介:张斌(1973-),男,高级工程师,主要从事地铁盾构研究,E-mail:364351316@qq.com。

汪优(通信作者),女,副教授,博士生导师,E-mail:ywang1920@csu.edu.cn。

Received: 2021-04-20

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51778633, 51308552); 2020 Science and Technology Research and Development Plan Guiding Subjects of China Railway Corporation (No. 41, 243)

Author brief:ZHANG Bin (1973-), senior engineer, main research interest: metro shield, E-mail: 364351316@qq.com.

WANG You (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: ywang1920@csu.edu.cn.

settlement. By setting a reasonable value of soil pressure, maintaining the balance of the digging surface, making the shield machine pass as smoothly as possible, while performing a grouting well, and filling the gap between the lining and the strata, the surface settlement caused by the shield can be effectively reduced.

Keywords: shield tunnel; surface subsidence; foundation subsidence; adjacent buildings; numerical simulation

盾构法作为地铁施工中一种安全、快捷的施工方法,得到了广泛应用,中国规划的地铁里程中一半以上均采用盾构法施工^[1]。由于地铁线大多穿行于繁华区域,新建地铁必然会受到周边复杂环境的制约,并且不可避免地穿越既有地铁隧道、桥梁、地下管线及城市建筑基础。因此,盾构施工不仅要满足工程自身的安全,还必须确保周边建筑的稳定。

地铁对建筑的影响主要表现在施工过程中引发地层扰动造成的地表沉降^[2-3]。大量工程实践表明,隧道开挖必定会扰动原有土层及围岩,破坏原有平衡状态,在完成管片衬砌之后,其周围地层才逐渐向新的平衡态转化^[4-5]。20世纪末,乔宗昭等^[6]针对盾构隧道沿线邻近建筑的保护及控制手段展开了研究,并对各个阶段均提出控制原则;此后,王智德等^[7]也依托武汉地铁论述了运用时空效应规律反映地表沉降的理论方法。Peck等^[8]、Attewell等^[9]结合采矿引起地面位移沉降估算方法,提出了隧道施工引起的地表沉降槽在垂直于隧道走向方向的形状近似于概率论中的正态分布曲线,Peck等^[8]提出的沉降计算公式为后期隧洞开挖引起的地表沉降控制提供了重要的理论基础。Sagasete^[10]也在地层不可压缩且各向同性的假设基础上提出了隧道开挖引起的地表三维沉降公式。这些早期理论主要基于工程实践及理论分析,发现的隧道施工引起的地表沉降规律为进一步研究预测隧道盾构施工诱发的周围建筑结构环境变化提供了丰富的理论储备。

随着计算机技术的发展,数值模拟逐渐成为岩土工程研究的常用手段,其在盾构隧道研究方面也得到了广泛的应用^[11-12]。王忠昶等^[13]借助Adina软件分析了隧道开挖造成的周围地层损失、围岩应力重分布引起的上部结构位移及内力变化规律。阚呈等^[14]、张姝磊^[15]通过有限差分程序研究了隧道施工诱发的既有建筑基础沉降规律。目前,有关盾构隧道下穿上部建筑的研究已经取得了丰富的成果,但大多集中于使用时间较短的新建建筑,其结构构件具有较强的整体性及稳定性。有关盾构隧道下穿老旧居民区的研究尚少,由于使用年限较长,老旧建筑结构构件及节点均有不同程度的老化,对于

基础变形更加敏感。笔者以南通地铁1号线环城东路至中级人民法院盾构区间下穿森大蒂花苑老旧居民区为研究对象,进行现场沉降监测及数值模拟,以探明盾构施工对既有建筑基础沉降的影响规律。

1 工程概况

南通市地铁轨道1号线一期全长39.46 km,共设车站28座,全部为地下线,线路走向如图1所示。环城东路站—中级人民法院站区间长约1.504 km,埋深16.5~28.0 m,采用盾构法施工;该区间沿人民东路与工农路下穿,途经东方农贸市场、和兴花苑、森大蒂花苑等老旧居民区。



图1 南通地铁1号线线路规划

Fig. 1 Planning of Nantong Metro Line 1

1.1 工程地质条件

南通市地处长江下游冲积平原,研究区范围内地势平坦,地面标高4.0~6.0 m。南通城市轨道交通1号线沿线跨越两种地貌类型(冲-海积网化平原、冲-海积新三角洲平原),环城东路站—中级人民法院站属冲-海积网化平原II2区地貌类型。全线水网稠密,地层富含水,软弱土层较厚,主要为粉质黏土、

粉土、粉细砂、细砂和中粗砂。其粉细砂地层为良好的富水和透水地层,该区间隧道穿越土层主要为砂质粉土夹粉砂、粉砂、砂质粉土夹粉质黏土,其上覆及下伏土层还包括砂质粉土、粉质黏土夹粉土、粉砂夹粉土、粉质黏土夹粉土。

1.2 盾构参数

研究工点位于南通市崇川区,根据南通周边地区盾构施工经验,选用土压平衡盾构施工工艺。土压平衡施工工艺适宜开挖软土地层,上海、苏州、无锡、常州等地区已建(在建)的地铁隧道基本上均采用土压平衡盾构施工,这些地区盾构穿越基本以粉土为主,而南通地区以粉土、砂土为主。盾构掘进速度为每天8环左右。土压平衡式盾构掘进时,工作面压力通过试推进100 m后确定,工作面压力波动范围小于0.01 MPa。研究区段使用的盾构机为中铁建土压平衡式盾构机,开挖直径均为6 440 mm,均为面板箱型辐条式刀盘,采用长度1 200 mm、外径6 200 mm、内径5 500 mm管片。

2 邻近建筑沉降观测及沉降分析

2.1 邻近建筑沉降监测点布设

环城东路站—中一级法院站区间线路穿行于森大蒂花苑3~7号楼以及11、12号楼下方,所穿居民楼均为6层的老旧住宅,房屋基底距离盾构顶板约11.3 m。由于隧道施工时所引起的地层损失和隧道周围地层受到扰动或剪切破坏的再固结造成地面沉降,形成沉降槽,势必引起邻近建筑物差异沉降。根据施工图纸,结合文献[16],掘进时必须对该区间沿线两侧50 m范围内房屋的沉降、倾斜进行监测。

邻近地面建筑物的变形监测主要包括基础的平均沉降量及差异沉降。测点布置原则为针对距隧道中线50 m以内的建筑物,在建筑物的拐角位置及承重构件处布置测点,各楼栋分别设置A~F共6个监测点,监测点布置如图2所示。监测频率为小于掘进面前20 m时2次/d,大于50 m时1次/周,量测精度为 ± 0.5 mm。建筑物监测控制指标应包括平均沉降控制值(20 mm)、平均沉降速率控制值(2 mm/d)和沉降速率最大控制值(3 mm/d)。

2.2 邻近建筑沉降观测结果

自隧道掘进以来,针对森大蒂花苑老旧居民区

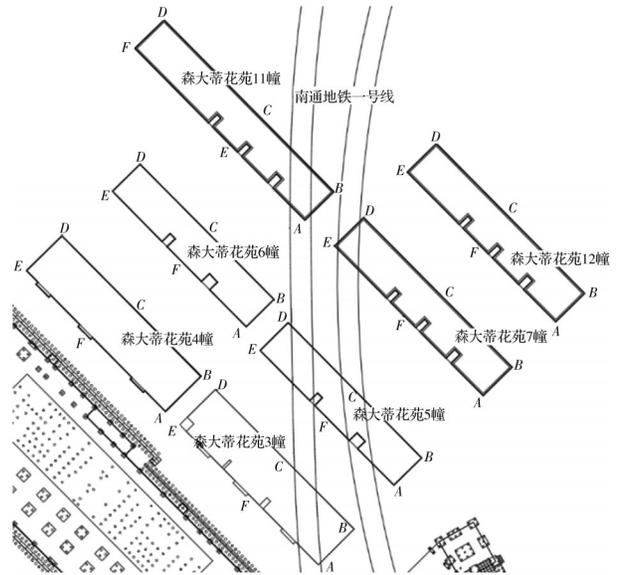


图2 研究区沉降观测测点布置

Fig. 2 Layout of surface settlement monitoring points in the study area

3~7号及11、12号共7栋住宅楼自2020年4月至7月持续进行了长达3个月的现场沉降监测。隧道于2020年5月4日开始依次下穿11、7、5、3号楼,根据监测结果所绘制沉降位移时程曲线如图3所示。

结合盾构施工过程中监控量测控制标准,分析线路穿行的森大蒂花苑居民区监测数据发现,该7栋6层住宅楼基础沉降最大值为最先通过的11号楼,其沉降值最大,达到8.1 mm,未超出容许沉降量(20 mm)。另外,截止到监测结束,各楼栋基础最终差异沉降中11号楼较大,达到8.42 mm,12号楼为7.42 mm,7号楼为4.87 mm,6号楼为2.79 mm,5号楼为7.39 mm,4号楼为3.87 mm,3号楼最小,仅为1.86 mm。

图3监测曲线表明,在砂质地层中,盾构施工对地面建筑物沉降的影响随时间在一定区域内可以近似进行指数拟合。即在下穿过程中,盾构机对土体的扰动及掘进造成的地层损失最终引起的地表沉降量随着时间的推移及盾构机的不断推进至远离,逐渐趋于稳定,其增量逐渐减小直至收敛。而根据每一栋住宅楼的基础沉降监测曲线,整理出平均沉降量时程曲线,如图4所示。

图4表明,各住宅楼基础平均沉降值随时间均有所增大。其中,盾构掘进最早影响到的11号楼最先发生沉降,同时也最先沉降稳定,而盾构机最后通行穿过3、4号楼,至6月底,3号楼才开始出现沉降,4号楼基础还未出现较大沉降。截止到监测结

束,5号楼基础平均沉降值最大,达到7.09 mm,小于10 mm。图5为各楼栋平均沉降速率,根据图5,盾构掘进过程中大部分基础的沉降均低于容许值

(2 mm/d),仅部分瞬时沉降速率超过最大控制值(3 mm/d),个别达到7 mm/d,表明盾构掘进引起的震动使地表建筑基础产生了短时间的震动。

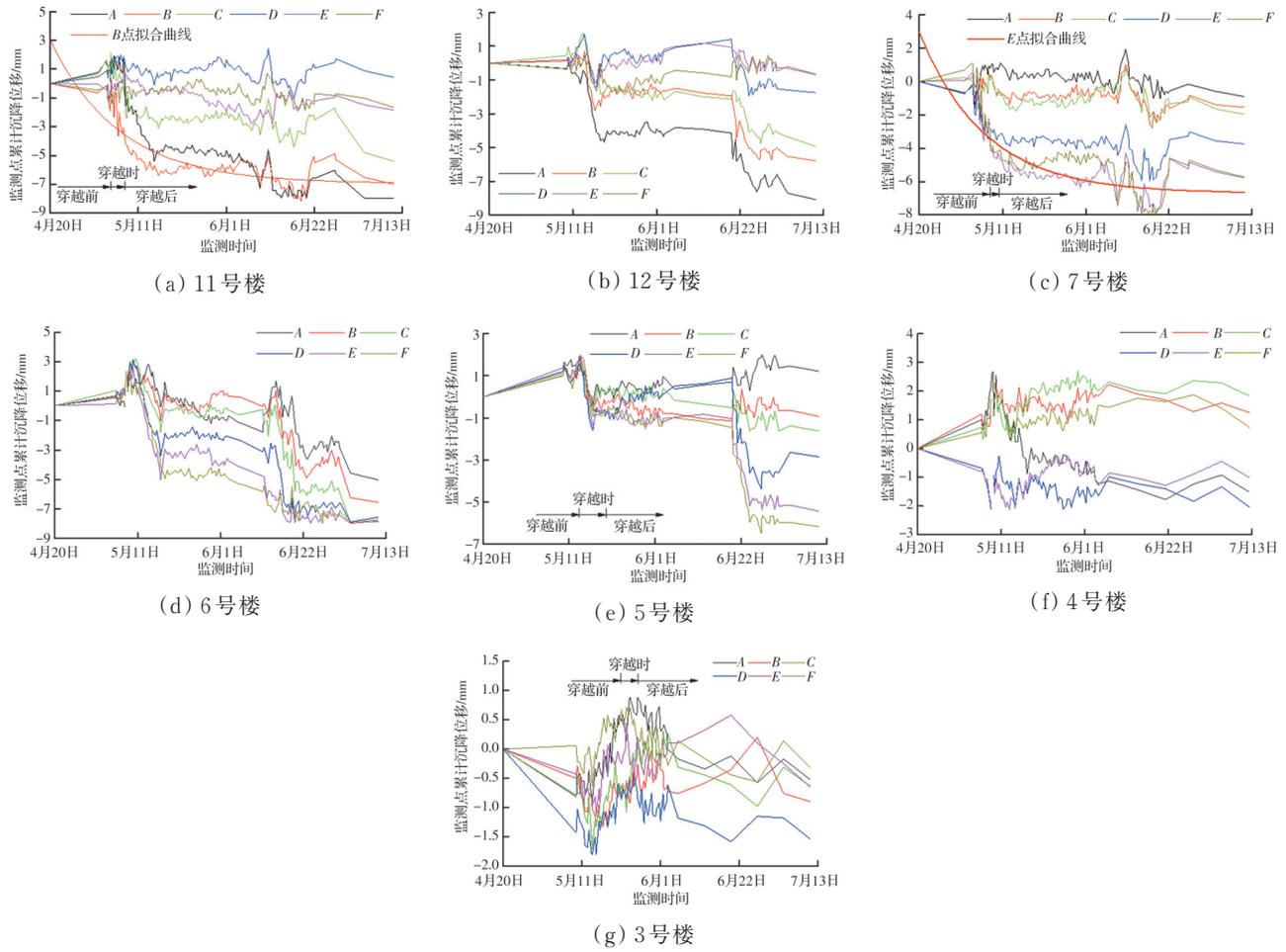


图 3 森大蒂花苑住宅楼沉降监测曲线

Fig. 3 Settlement monitoring curves of the buildings of Sendadi Huayuan

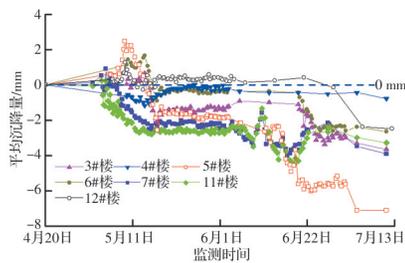


图 4 各楼栋基础平均沉降量

Fig. 4 Average settlement of foundation of each building

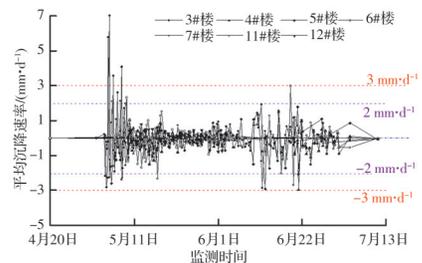


图 5 各楼栋基础平均沉降速率

Fig. 5 Average settlement rate of foundation of each building

2.3 邻近建筑沉降分析

盾构法施工会引起较大的地面沉降,掘进面土体初始应力场的平衡条件破坏是导致地层扰动和地面沉降的根本原因。根据盾构施工过程中对盾构机状态的监控,结合地表沉降监测情况发现,在

盾构机掘进过程中,机头的不稳定是造成隧洞周围土体扰动过大的诱因之一,而掌子面的压力分布不平衡是引起机头不稳定的重要原因。土体是一种三相介质,土中的孔隙水作为地层中重要的承压部

分,很大程度上影响着掌子面的压力分布。研究区间隧道与各楼栋的相对位置类型及对应建筑下的地层分布如图 6 所示。该线路中盾构机主要在砂土、粉土中掘进,涉及的粉砂夹粉土、粉砂层含潜水,砂质粉土夹粉质黏土为承压含水层,与下伏粉质黏土夹粉土层存在水力联系,含水层总厚度较大,含水量较丰富。施工过程中发现,盾构掘进遇到粉土、砂土时,正面土体的孔隙水消散很快,其抗

剪强度及盾构机侧面的摩阻力急剧上升,使盾构刀盘扭矩和总推力达到极限值,机头扭转不稳定;而粉土、砂土在水动力作用下极易产生流砂等现象,也是造成盾构机掘进不稳定的原因之一。在线路掘进过程中,穿行前及时调整盾构机姿态,穿行时掘进速度推进较慢,严格控制掌子面的平衡,穿行后及时进行衬砌注浆加固,因此,邻近建筑并未发生显著沉降,差异沉降量也并未超限。

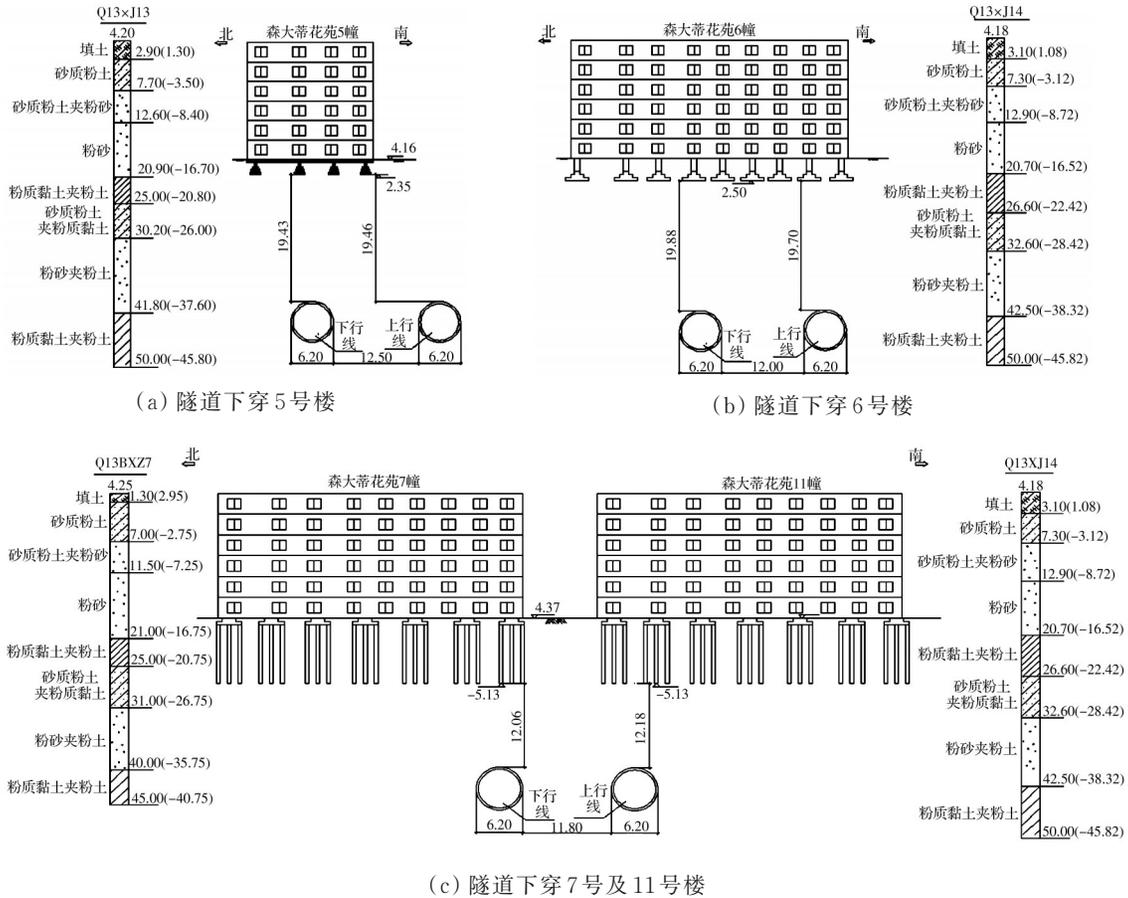


图 6 隧道至森大蒂花园居民区穿越类型(单位:m)

Fig. 6 The type of tunnel under-pass in the community Sendadi-Huayuan (Unit: m)

由于粉土、砂土具有一定水压力,水头埋深介于 2~5 m,因此,掘进过程中可不断调整土仓压力以平衡工作面压力,通过维持注浆压力稳定保证注浆质量,结合试推区间监测情况严控浆液初凝时间,以避免土体从盾尾涌入及渗水、涌砂现象发生。当掘进至粉质黏土夹粉土等软塑状态地层时,由于其含水量高、压缩性强、强度低,且具有明显的触变性,在动力作用下易发生流变变形等特性,土体强度易降低并导致地层沉降位移增大,因此,施工时严格控制对该层土的扰动可有效避免地表沉陷。

工作面处于粉土、砂土层和黏性土夹层界面而

时,由于在软硬不同的土层界面推进,两部分不同的阻力差易造成相对软弱层排土过多而引起盾构方向失控,使机头在线路方向上偏离,甚至出现“磕头”现象,最终引起的地层不稳定也会造成地面建筑的不均匀沉降。

综上所述,盾构施工引起的地层损失和隧道周围受扰动或剪切破坏的土体重塑再固结是导致隧道沉降和影响周围建筑物的主要原因。该线路环城东路站—中级法院站区间盾构主要位于砂质粉土夹粉质黏土层,该层局部夹粉质黏土且局部位于粉质黏土夹粉土层,隧道在穿行于两层界面时沉降

量相对较大。在盾构施工时及时注浆加固,填充盾构施工产生的空隙,提高注浆质量,有效地控制了地表沉降,减少了对邻近建筑的影响。

3 盾构掘进数值模拟

结合南通地铁 1 号线环城东路站—中级法院站区间穿越森大蒂花苑居民区调查及沉降监测结果,利用 FLAC3D 有限差分计算程序,针对盾构机穿越 3~7 号及 11、12 号楼引起的基础沉降进行数值模拟。针对盾构机在通过邻近建筑时引起的基础下沉分布发展规律进行总结,以分析隧道的掘进对地表邻近基础造成的沉降作用效应。同时,针对盾构掘进引起的地表及各地层沉降规律进行总结,对各地层出现的塑性区进行分析,以明确盾构掘进造成周边土层扰动的程度及对周围环境产生影响的范围。

3.1 模型建立及参数确定

计算建模范围确定为双线通过森大蒂花苑居民区 3~7 号及 11、12 号住宅楼范围内,由于隧道盾构掘进影响范围约为隧道中心两侧 30 m^[14],而该线路上下行线隧道中心穿越该小区的平均间距为 18.44 m,结合计算范围内各楼栋基础的分布宽度,确定模型宽 196 m、纵深 174 m、高 50 m,隧道直径 6.44 m,衬砌管片每段长 1 m、厚 0.35 m。模型高度

根据计算需求,充分考虑隧道掘进对于周围岩层的影响,尺寸过小可能会产生边界效应,尺寸过大则会造成计算量过大,难以平衡。网格的划分根据计算考察的范围,对隧道周围网格种子间距及衬砌均进行了加密,计算模型如图 7 所示。

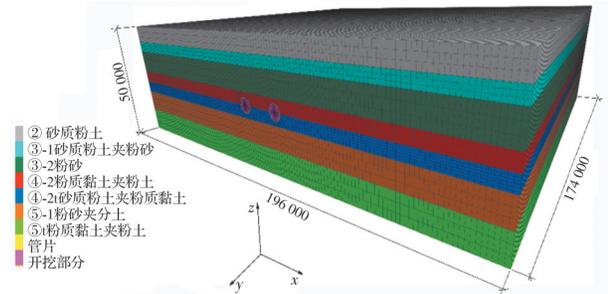


图 7 盾构掘进计算模型(单位:mm)

Fig. 7 Computational model for shield tunneling

(Unit: mm)

模型开挖部分在开挖前根据其所在位置赋予相应土层的材料参数,开挖采用 Null 模型,其他各层土体采用 Mohr-Coulomb 模型,盾构隧道管片采用实体单元弹性本构模型,混凝土强度等级为 C50,弹性模量为 34.5 GPa,各土层及衬砌力学性质参数取值见表 1,其中,各参数取值依据该区间岩土工程勘察报告,线路穿行的居民区地表进行水平简化。

表 1 各地层及衬砌力学性质参数

Table 1 Mechanical property parameters of each stratigraphic and tunnel lining

层号	土层名称	土层厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	剪切模量/MPa	体积模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
②	砂质粉土	6.99	18.2	15.846	34.333	7.7	23.0
③-1	砂质粉土夹粉砂	4.48	18.5	22.596	48.958	4.7	27.8
③-2	粉砂	9.52	18.6	25.115	54.417	4.5	28.8
④-2t	砂质黏土夹粉质黏土	4.00	18.0	11.827	25.625	8.1	18.4
④-2	粉质黏土夹粉土	6.00	18.2	16.615	36.000	6.5	19.2
⑤-1	粉砂夹粉土	9.00	18.6	23.115	50.083	3.5	27.3
⑤t	粉质黏土夹粉土	10.01	18.0	11.827	25.625	8.1	18.4
衬砌	C50 混凝土	0.35	25.0	14 781.491	17 267.267		

3.2 模型边界条件及计算设置

除地表设为自由边界外,其余各面均设置法向速度约束,掘进计算前进行地应力平衡。由于隧道埋深较浅,因此,仅考虑自重应力,不考虑构造应力。参考《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)^[17]及其他相关研究,将各楼栋对地层的荷载简化为竖向均布荷载,取值为 105 kPa,随地应力一同平衡后,将位移清零并重新计算在建筑荷载及盾构掘进过程引起的地表沉降。模型的计算按照每掘进 3 m 进行一次衬砌并计算平衡,整个模型通过 58 次计算

完成。

针对该问题进行的数值模拟主要考察盾构隧道在掘进过程中引起的地层损失以及对其进行衬砌支护后的重新平衡整个过程对地表邻近建筑基础沉降的影响。而对于支护的模拟,主要通过将原有的实体单元分组,由 Mohr-Coulomb 本构模型(模拟原地层土体)转变为 Null 模型(模拟开挖)后进一步再转变为 Elastic 弹性模型(模拟管片),以达到模拟隧洞的掘进及衬砌过程,即在模拟计算过程中管片与隧洞洞壁之间并不存在间隙,因此,数值模拟

过程中并未考虑计算注浆引起的压力变化。

3.3 邻近建筑沉降分析

3.3.1 盾构掘进引起地层竖向位移分布 根据南通地铁1号线下穿森大蒂花苑居民区盾构掘进进行模拟计算,隧道掘进不同阶段的掘进面竖向位移云图如图8、图9所示。

图8表明,在盾构掘进的不同阶段,隧道最大沉降值均发生在掌子面顶部,同时地表也反映出微量沉降。根据计算结果,在穿行于几栋建筑之前(开

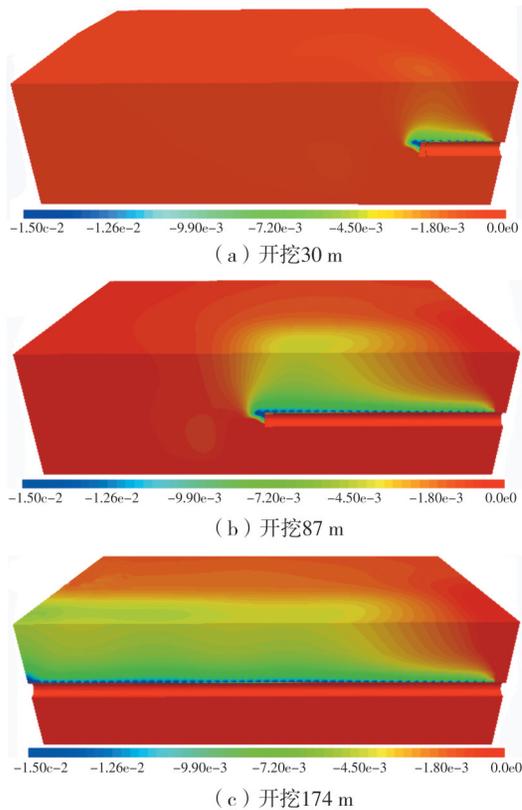


图8 不同掘进阶段隧道竖向位移云图(单位:m)

Fig. 8 Tunnel vertical displacement contour at different shield tunneling stages (Unit: m)

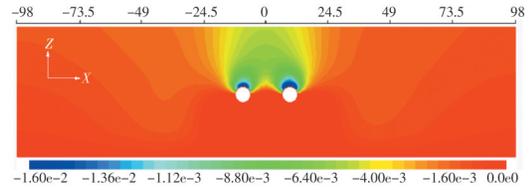


图9 地层横断面竖向位移分布云图(单位:m)

Fig. 9 Vertical displacement distribution contour of stratigraphic cross-section (Unit: m)

挖30 m),盾构机引起的地表沉降量约为1.5 mm,但穿行时(开挖87 m)及穿行后(开挖174 m)引起地表沉降量值分别为4.0、5.1 mm。图9表明,隧道掘进后引起其上部土层的沉降位移并形成沉降槽,横向地表沉降影响范围约为隧道两侧24.5 m。

图10为不同穿行阶段隧道的塑性区分布,伴随盾构隧道掘进对原有土层的扰动,掌子面顶部及隧洞顶部土体极易发生下沉,进而使该部分土体转为拉应力状态,从而造成土体的拉剪破坏,形成局部塑性区。而在掘进后,伴随及时衬砌,隧洞周围的塑性区由掘进时的拉剪破坏向新的平衡态转化,最终在衬砌完成后转化为剪切应变区。当隧道掘进及衬砌完成后,当前拉剪区消失,仅保留一层剪切应变区。衬砌提供的支撑反力使隧道周围土体稳定,地表沉降收敛。

3.3.2 邻近建筑沉降分析 数值模拟计算前,首先在森大蒂花苑居民区3~7号及11、12号楼四角及长边中心设置监测点,以监测其沉降位移,各测点位置如图11所示。伴随盾构隧道的掘进及支护,其上部土层会由掘进阶段的下沉逐渐转变为稳定并重新达到平衡态,森大蒂花苑7栋主要住宅楼基础沉降随盾构隧道的掘进监测曲线如图12所示。

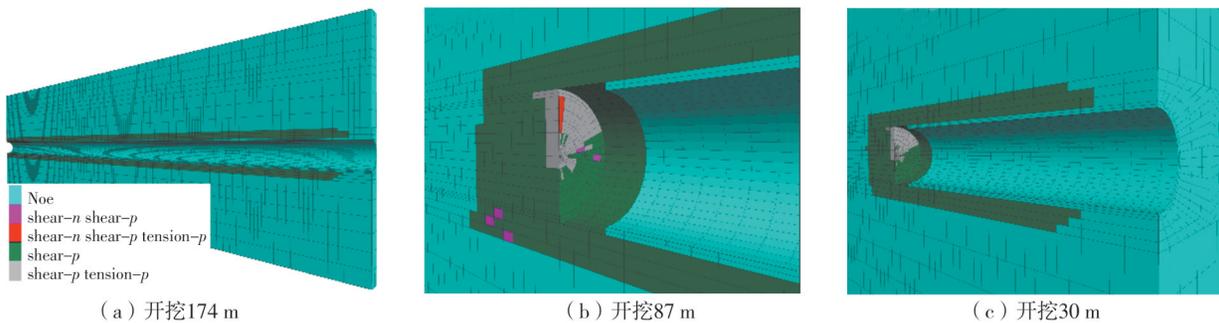


图10 不同掘进阶段隧洞周围塑性区分布

Fig. 10 Plastic zone distribution of tunnel surrounding rock in different shield tunneling stages

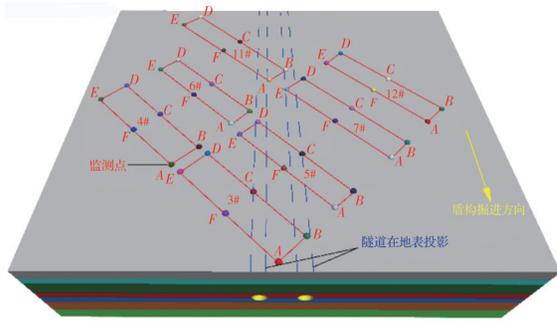


图 11 地表沉降监测点布置

Fig. 11 Layout of surface settlement monitoring points

根据监测曲线,隧道斜穿该居民小区,隧道的掘进最先通过11号楼及12号楼,其中7号楼与11号楼并列。由于12号楼为邻近建筑但隧道并未从其基础下方通过,因此,隧道掘进过程中引起的沉降量较小,并在完成支护后有所回升。根据图12(a),11号楼距离隧道最近的A点及B点受隧道掘进影响最大,其余各监测点未出现由于隧道掘进引起的沉降量造成的差异沉降。同理,相对于其他监测点,7号楼D、E监测点,6号楼B监测点,5号楼C、

D、E、F监测点3号楼A、B、C监测点均因盾构掘进产生了明显的沉降,而与12号楼类似,由于隧道未直接下穿,4号楼受隧道掘进的影响较小。

总体分析图12中监测曲线发现,盾构隧道掘进引起的邻近建筑基础沉降均小于4 mm,5号楼基础沉降值最大,为3.6 mm,小于现场监测结果(7.09 mm)。而伴随支护的完成,上覆地层沉降逐渐稳定甚至有所回升,其中隧道直接下穿的建筑邻近基础沉降量出现显著波动,穿越过程中沉降值大于同建筑其他基础测点。与现场监测结果之间存在误差的原因可以归结为材料参数的取值以及选取的本构关系还难以完全还原现场情况,同时,现场沉降情况受到多种复杂工况的影响,模拟过程中仅考虑了地铁隧道的掘进,因此,计算结果小于现场监测结果。

4 盾构掘进穿越邻近建筑的施工建议

结合南通地铁1号线下穿森大蒂花苑老旧小区实际施工情况及邻近建筑沉降监测结果与数值模拟计算情况,在穿越邻近建筑物时,针对盾构施

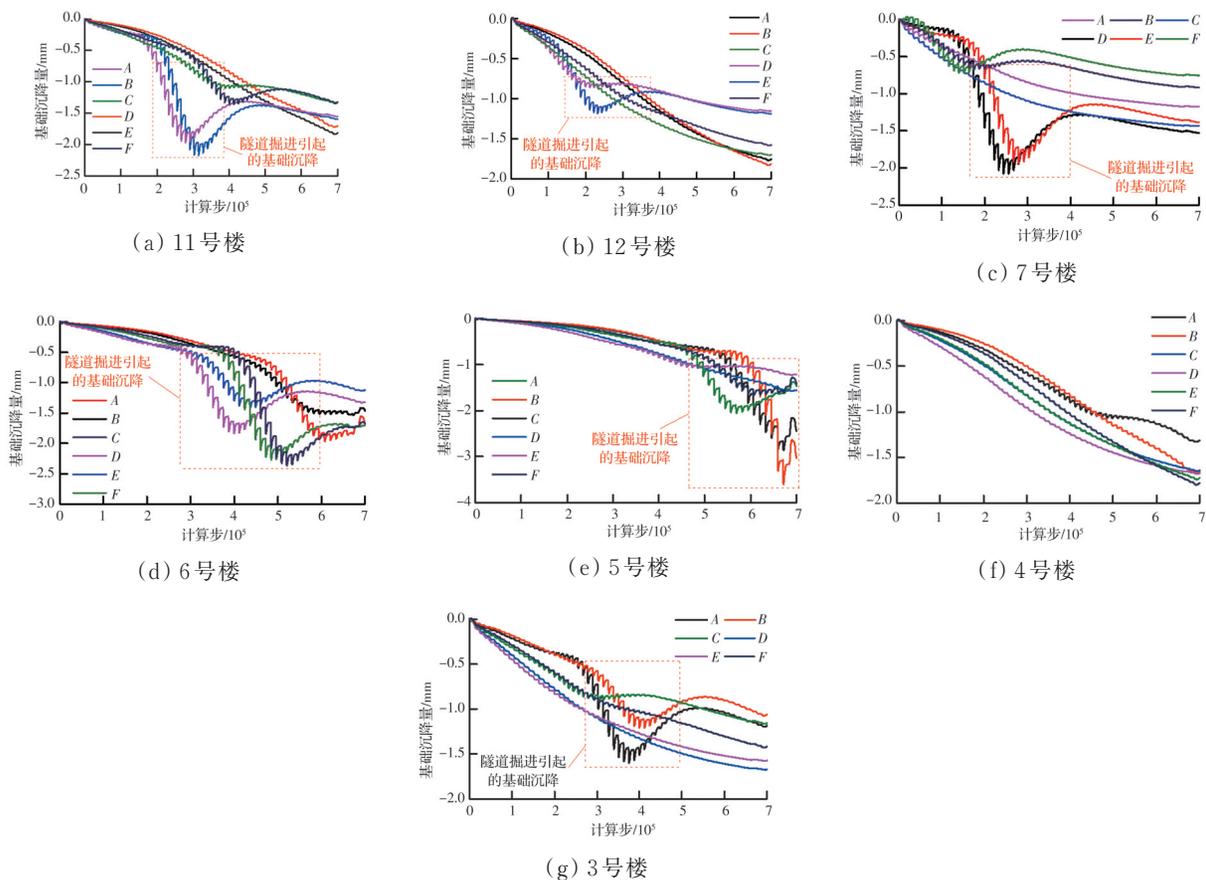


图 12 基础沉降曲线

Fig. 12 Settlement curves of the foundation

工不同穿越阶段:穿越邻近建筑前调整好盾构机姿态,穿越时降低推进速度,控制总推力,减少纠偏次数及纠偏量,避免土层扰动,保证一次穿过;穿越后严格控制好盾尾注浆,同时加强跟踪注浆,减小后期沉降。

穿越密集房屋前对刀具进行检查及更换,在掘进中根据不同的土体松散系数及时调整并严格控制出土量。及时同步注浆,严格控制注浆压力,同步注浆量控制在 6 m^3 以上,注浆压力控制在 200 kPa 以上。

试推过程中,掘进参数宜通过不断监测掘进情况进行调整后确定,可参考如下:推进平均速度控制在 $40\sim 45\text{ mm/min}$,该项目每日推进8环左右,速度较为合理,因此,日进度可控制在 $8\sim 12$ 环;土仓压力大于 200 kPa 能够较好地平衡工作面压力,建议值可介于 $260\sim 270\text{ kPa}$;推力可控制在 $14\ 000\sim 16\ 000\text{ kN}$,扭矩小于 $2\ 500\text{ kN}\cdot\text{m}$;刀盘转速控制在 $1.0\sim 1.2\text{ r/min}$;注浆压力为 $400\sim 500\text{ kPa}$,保证每环实际注浆量不少于 5.5 m^3 。

5 结论

1)在砂土、粉土中掘进时,盾构隧道正面土体孔隙水消散较快,抗剪强度及盾构侧面的摩阻力易急剧上升,使盾构刀盘扭矩和总推力达到极限值,易导致机头扭转,造成开挖不稳定。

2)在水动力作用下,粉土、砂土易产生流砂等现象,引起的盾构掘进不稳定是造成地层及围岩应力场平衡破坏,最终引起围岩扰动、地表下沉的原因之一。

3)在穿越邻近建筑物时,设置合理的土仓压力值,保持正面平衡,穿越时降低推进速度,控制总推力,减少土层扰动;穿越前调整好盾构姿态,穿越时减少纠偏次数及纠偏量,以避免土体的扰动,保证一次穿过;严格控制好盾尾注浆,同时加强跟踪注浆。另外,配合衬砌与地层间空隙的填充注浆技术、衬砌的防水堵漏技术等均能够有效避免地表及邻近建筑的沉降量过大。

4)富水砂层中,盾构施工对地面建筑物沉降的影响随时间在一定区域内近似表现出指数下降。但在下穿过程中,盾构对土体扰动引起的地表沉降量随着盾构机的不断远离最终趋于稳定。

参考文献

[1] 蔡义,张成平,闵博.邻近上覆空洞浅埋隧道施工引起

的地层变形和破坏特征[J].铁道学报,2019,41(9):118-127.

CAI Y, ZHANG C P, MIN B. Analysis of ground deformation and failure induced by shallow tunneling with cavity in the overlying strata [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(9): 118-127. (in Chinese)

[2] 王梦恕.中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J].隧道建设,2014,34(3):179-187.

WANG M S. Tunneling by TBM/shield in China: State-of-art, problems and proposals [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179-187. (in Chinese)

[3] 张顶立,方黄城,陈立平,等.隧道支护结构体系的刚度设计理论[J].岩石力学与工程学报,2021,40(4):649-662.

ZHANG D L, FANG H C, CHEN L P, et al. Stiffness design theory for tunnel-support system [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(4): 649-662. (in Chinese)

[4] 管凌霄,徐长节,可文海,等.盾构隧道下穿管道施工引起的管道水平位移研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(6):54-62.

GUAN L X, XU C J, KE W H, et al. Analysis of horizontal pipeline deformation caused by shield tunnelling [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(6): 54-62. (in Chinese)

[5] 刘金慧,丁万涛,戴尊勇,等.土压平衡盾构隧道施工引起的地层损失及影响因素[J].土木建筑与环境工程,2017,39(5):1-8.

LIU J H, DING W T, DAI Z Y, et al. Analysis of ground loss and its factors induced by EPB shield tunnel construction [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(5): 1-8. (in Chinese)

[6] 乔宗昭.盾构法隧道沿线邻近建筑的保护与控制[J].地下工程与隧道,1989(4):14-22.

QIAO Z Z. Protection and control of adjacent buildings along shield tunnel [J]. Underground Engineering and Tunnels, 1989(4): 14-22. (in Chinese)

[7] 王智德,江俐敏,饶宇.基于时空关系的盾构开挖地表沉降规律[J].土木与环境工程学报(中英文),2019,41(1):62-69.

WANG Z D, JIANG L M, RAO Y. Estimation of ground settlement induced by shield tunnel excavation based on the time-space relationship [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 62-69. (in Chinese)

[8] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [C]//7th International Conference on Soil

- Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecanica de Suelos, 1969: 225-290.
- [9] ATTEWELL P B, Ground movements caused by tunneling in soil [C]//Conference on Large Ground Movements and Structures, London, 1978: 812-948.
- [10] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [11] CHEN R P, MENG F Y, YE Y H, et al. Numerical simulation of the uplift behavior of shield tunnel during construction stage [J]. Soils and Foundations, 2018, 58 (2): 370-381.
- [12] WANG Z C, LI G D, WANG A X, et al. Numerical simulation study of stratum subsidence induced by sand leakage in tunnel lining based on particle flow software [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38 (4): 3955-3965.
- [13] 王忠昶, 王川, 朱训国, 等. 盾构隧道施工对邻近建筑结构的影响分析[J]. 中国科技论文, 2018, 13(13): 1488-1493.
- WANG Z C, WANG C, ZHU X G, et al. Study on construction influences of shield tunnel excavation to the adjacent buildings [J]. China Sciencepaper, 2018, 13 (13): 1488-1493. (in Chinese)
- [14] 阚呈, 李建军. 连拱小净距隧道对邻近高层建筑基础的影响研究[J]. 铁道建筑技术, 2018(2): 77-81, 102.
- KAN C, LI J J. Impact study of triple-arch closely-spaced tunnel construction on foundation of adjacent high-buildings [J]. Railway Construction Technology, 2018(2): 77-81, 102. (in Chinese)
- [15] 张姍磊. 北京地铁土压平衡盾构施工对既有建筑物影响分析[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- ZHANG S L. Impact analysis of earth pressure balance shield tunnel construction on existing buildings in Beijing subway [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010.
- [16] 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Technical Code for Urban Rail Transit Engineering Monitoring: GB 50911—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [17] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Load Code for Building Structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

(编辑 胡玲)