

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221112004

盾构隧道施工对邻近建筑物差异沉降与扭曲变形影响分析*

孙 帅¹, 常连翠², 张 煌¹, 丁建文¹, 刘晋余¹

(1. 东南大学交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 山东省嘉祥县住房和城乡建设局, 山东 济宁 272400)

摘要: 针对盾构隧道施工侧穿既有建筑物问题, 结合南京地铁一号线北延段工程, 以盾构隧道侧穿某浅基础建筑物为研究对象, 通过对建筑物沉降实测数据进行分析, 并利用Plaxis 3D软件建立数值模型, 研究了隧道距建筑物不同水平距离和盾构以不同角度穿越对建筑物差异沉降与扭曲变形特征的影响。结果表明: 随着盾构开挖面逐渐接近建筑物, 建筑物差异沉降及扭曲变形逐渐增大; 差异沉降量在盾构机通过时达到最大值, 之后趋于稳定, 而扭曲变形峰值出现在盾构开挖面到达建筑物中点截面位置时, 随后逐渐减小; 当建筑物中心至隧道轴线的水平距离与隧道外径之比 $L/D=0.5\sim 2$ 时, 建筑物差异沉降量较大, 在 $L/D=1.5$ 时达到峰值; 当盾构穿越夹角从 $\theta=0^\circ$ 增大至 $\theta=90^\circ$ 时, 建筑物最大差异沉降量不断增加, 而最终扭曲变形值则先增大后减小, 在 $\theta=45^\circ$ 时扭曲变形达到峰值。研究结果可为盾构隧道侧穿浅基础建筑物时相关类似工程提供参考。

关键词: 盾构隧道; 浅基础建筑物; 差异沉降; 扭曲变形

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0459-08

Impact of Shield Tunnel Construction on Differential Settlement and Twist Deformation of Adjacent Buildings

SUN Shuai¹, CHANG Liancui², ZHANG Huang¹, DING Jianwen¹, LIU Jinyu¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiaxiang County Housing and Urban-Rural Development Bureau, Shandong Province, Jining 272400, China)

Abstract: This study investigated the response of existing buildings to the side-crossing of shield tunnel construction. It focused on shallow foundation buildings intersected by the shield tunnel along the northern extension of Nanjing Metro Line 1. Field data on building settlements were analyzed, and a numerical model was established using PLAXIS 3D software. The study examined how different horizontal distances between the tunnel and the building, as well as various crossing angles, affected the characteristics of differential settlement and twist deformation. The results showed that as the shield's excavation surface approached the building, the differential settlement and twist deformation of the building gradually increased. The differential settlement reached its maximum when the shield machine directly passed underneath, after which it stabilized. The peak twist deformation occurred when the excavation

* 收稿日期: 2022-11-12; 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(51978159)资助

作者简介: 孙帅(1997—), 男, 硕士研究生。主要从事盾构施工对建筑物影响研究。E-mail: 220203210@seu.edu.cn

通讯作者: 丁建文(1975—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事盾构隧道、软基处理等方面的研究。

E-mail: jwding@seu.edu.cn

surface reached the midpoint section of the building, and gradually decreased thereafter. When the ratio of the horizontal distance between the building's center and the tunnel's axis to the tunnel's outer diameter ranged from 0.5 to 2 ($L/D=0.5\sim 2$), the differential settlement of the building was larger, and reached its peak when L/D ratio was 1.5. As the shield crossing angle increased from 0° to 90° , the maximum differential settlement of the building increased accordingly. In contrast, the final twist deformation increased first and then decreased, reaching its peak at 45° crossing angle. The research results provide references for similar projects involving shield tunneling passing through shallow foundation buildings.

Keywords: shield tunnel; shallow foundation building; differential settlement; twist deformation

0 引言

城市地铁区间盾构施工时常需穿越既有建筑物,若在盾构掘进过程中控制及处理不当,易引起建筑物倾斜与开裂破坏,甚至造成建筑物损毁、倒塌等重大安全事故^[1-4]。因此,关于盾构隧道施工对邻近建筑物的影响研究引起了越来越多的关注。关于盾构下穿建筑物引起建筑物沉降与变形,不少学者做了相关研究^[5-9],主要研究方法有理论推导、实测分析和有限元数值模拟。

在理论分析方面,欧阳文彪等^[10]给出了考虑建筑物刚度时单线及双线盾构隧道穿越建筑物引起的地表沉降计算公式;丁智^[11]利用修正的 Sagaseta 纵向地面变形计算公式,推导出了盾构掘进区域浅基础(短桩基础)建筑物地基、基础和结构协同作用的力学模型及理论解;S. Matt 等^[12]引入了基于最大拉应变的 DPI 指标,研究建筑物在正向挠曲段和负向挠曲段的不同变形特征。现场实测主要是通过信息化施工监测手段,及时掌握盾构施工过程对上部建筑物与地表变形的影响,可以适时调整盾构施工参数,保证盾构隧道施工和上部邻近建筑物的安全。W. W. Frischmann 等^[13]分析了盾构穿越不同刚度建筑物的沉降和倾斜实测数据,研究了建筑物刚度对变形的影响。G. G. Lin 等^[14]对盾构隧道下穿路堤进行沉降监测,并通过分析提出了降低路堤沉降的方法。数值模拟方法也在岩土工程领域应用广泛,丁祖德等^[15]通过建立三维非线性有限元模型,研究地铁隧道施工对临近地建筑物影响。魏新江等^[16]对邻近建筑物工况的盾构隧道施工进行模拟,分析地面沉降和建筑物的变形与受力情况。Z. D. Ding 等^[17]建立了考虑建筑物-土-隧道相互作用的三维有限元模型,研究建筑物楼层、基础类型和结构刚度

等因素对建筑物变形的影响。T. I. Addenbrooke 等^[18]引入了结构相对刚度的概念,建立数值模型分析盾构隧道施工对上部建筑物结构安全的影响。

目前关于盾构隧道施工对邻近建筑物差异沉降与扭曲变形影响研究相对较少,尤其对于使用年限较长的浅基础砖混结构类型的建筑物,差异沉降与扭曲变形会对其安全性产生显著影响。因此,本文以南京地铁一号线北延段为工程背景,对盾构隧道施工影响范围内某一浅基础砖混结构建筑物进行实测分析与数值模拟,着重针对建筑物差异沉降、扭曲变形等指标展开探究,分析隧道与建筑物水平距离以及盾构不同穿越角度对建筑物的影响。本研究也可为盾构隧道侧穿浅基础建筑物时沉降变形控制提供参考。

1 工程背景

南京地铁一号线迈皋桥站-晓庄站区间是南京市已运营地铁一号线北延伸段的第一标段。此区段地层为土岩复合地层,隧道全线采用盾构法施工。隧道埋深位置为土层与岩层交界处,盾构开挖面范围内地层为粉质黏土和强风化砂岩,隧道上方地层从上到下依次为:杂填土、粉质黏土、黏质粉土,隧道下方地层为强风化砂岩和中风化砂岩,图 1 为盾构隧道区间典型地质剖面。

该隧道区间沿线需下穿地面众多构筑物,地面环境比较复杂。其中左线隧道近接侧穿通过一老旧浅基础建筑物,隧道与该建筑物水平距离约为 1 m。该建筑物总共有三层,长约 10 m,宽约 8 m,其墙体为砖混结构,年代较久,风化较严重,承受变形能力差,安全风险较大,故选取其为重点研究对象。邻近该建筑物的隧道盾构区段平均埋深约 15 m,隧道半径为 6.2 m,地下水埋深较浅,约为 1.10~3.00 m。建筑物与盾构隧道相对位置关系如图 2 所示。

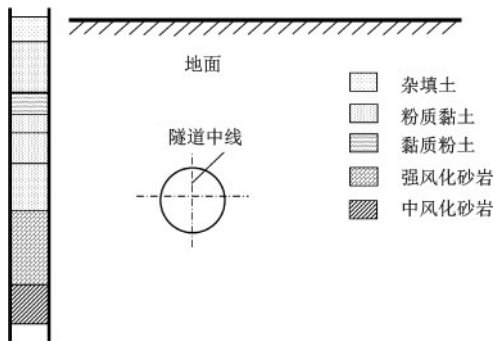


图1 典型地质剖面

Fig.1 Typical geological section

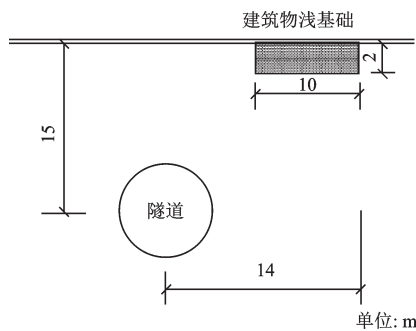


图2 建筑物与隧道位置关系

Fig.2 Schematic diagram of relationship between the building and tunnel positions

2 建筑物沉降变形实测结果分析

盾构隧道施工必然导致地层位移变形,进而影响地表建筑物的安全稳定。根据《城市轨道交通工程监测技术规范》^[19],盾构掘进施工时需要隧道沿线影响范围内建筑物进行监测。对于该浅基础砖混结构建筑物,进行重点加密监测,掌握其整体沉降变形情况。为此共设置了12个监测点,图3为浅基础建筑物实测点布置示意。

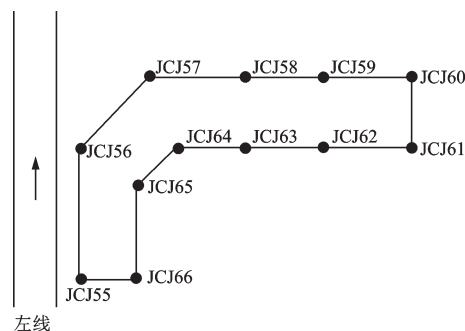


图3 建筑物实测点布置

Fig.3 Layout of measured points on the building

2.1 建筑物整体沉降规律

在实际盾构掘进过程中,盾构开挖面先后到达测点JCJ55和JCJ66所处位置,测点JCJ55与JCJ66至隧道距离基本相同。图4为建筑物各监测点随盾构隧道施工进程的沉降曲线,由图4可见,建筑物存在明显的差异沉降。建筑物监测点JCJ60和JCJ61距离隧道较远,其最终沉降较小。建筑物测点位置距离盾构隧道距离越近,其受到盾构施工扰动影响越大,在盾构开挖面接近建筑物这段时间内,建筑物靠近隧道的测点JCJ55和JCJ66沉降量迅速增加。在盾构开挖面通过建筑物之后,建筑物各测点沉降值稍有减小并最终基本趋于稳定。在这一时期,由于盾构施工壁后注浆及二次注浆的浆液凝固强度提升,对于地层位移产生了影响。总体而言,盾构侧穿建筑物时,建筑物产生了差异沉降,整体向隧道一侧倾斜。

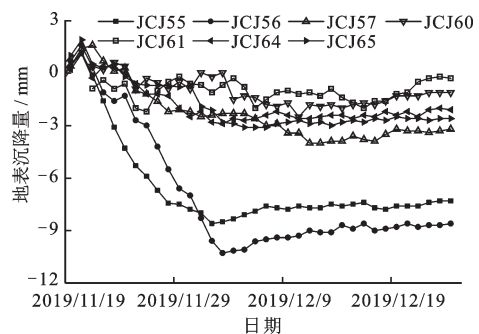


图4 建筑物沉降曲线

Fig.4 Settlement curves of the building

2.2 建筑物差异沉降规律

建筑物基础的不同位置沉降不同,这将导致建筑物倾斜、开裂甚至扭曲,建筑物基础底部的附加应力将重新分布,建筑物结构内力也会随之改变,从而导致建筑物变形破坏。选取JCJ56、JCJ57、JCJ60、JCJ61这4个监测点,分别计算测点JCJ56和JCJ61、JCJ57和JCJ60的沉降差,得到建筑物的差异沉降情况,如图5所示。从图5中可以看出,JCJ56-JCJ61和JCJ57-JCJ60的差异沉降曲线规律相似,都是先增大达到峰值后逐渐减小至稳定。建筑物JCJ56-JCJ61截面的差异沉降量较大,最大值接近10mm,原因是监测点JCJ56和JCJ61之间沿垂直隧道方向的水平距离最远,差异沉降量也就更大。根

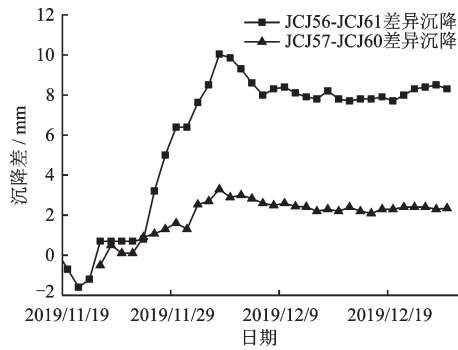


图5 建筑物差异沉降曲线

Fig.5 Differential settlement curves of the building

据《建筑地基基础设计规范》^[20],选取建筑物的沉降差允许值为 $0.002 L_0$ (L_0 为两柱基中心之间的距离, $L_0=5\text{ m}$), 沉降差允许值 $[\Delta]=0.002 \times 5=10\text{ mm}$ 。建筑物的最大差异沉降量已接近规范中的允许值, 在盾构通过时存在破坏的风险。根据监测数据实时反馈, 合理调整盾构参数并加强壁后注浆后, 最大差异沉降量逐渐减小, 最终稳定在8.5 mm左右。因此在盾构隧道施工中, 对临近建筑物的沉降情况进行实时监测非常重要。当出现差异沉降较大的情况时, 可根据反馈结果及时采取控制措施。

3 盾构施工数值模拟

利用有限元软件Plaxis 3D建立隧道-地层-建筑物基础相互作用的三维计算模型。由于建筑物在隧道施工前早已存在, 建筑物基础和土层的沉降在自重作用下已经趋于稳定, 假定建筑物基础和地层

的位移完全是地铁隧道施工扰动引起的。此外, 还有以下假设: (1) 各地层基本呈水平分布; (2) 忽略隧道小坡度的影响, 模型中默认隧道埋深不变; (3) 不考虑隧道掘进过程中的地层固结变形和地下水渗流的影响。

3.1 计算模型及计算参数

考虑到隧道施工影响范围和模型边界效应, 模型X、Y、Z方向上的尺寸分别为80、80、40 m。在数值模型中, 将该建筑物的整体结构简化为上部等效荷载作用下的浅基础, 如图6所示。土层本构模型采用土体硬化(HS)模型, 岩层选用Mohr-Coulomb(MC)本构模型模拟。建筑物基础、地层和盾构管片由实体单元模拟, 浅基础材料弹性模量取 $2 \times 10^5\text{ MPa}$ 。管片衬砌采用混凝土材料模拟, 弹性模量取 $3.3 \times 10^5\text{ MPa}$, 管片内径为5.5 m, 外径为6.2 m, 每环管片宽度为1.2 m。盾构机采用板单元模拟, 材料类型为弹性材料。根据现场试验和相关规范, 计算采用的地层和盾构机参数见表1~2。

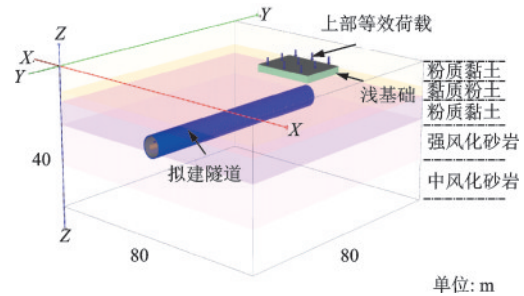


图6 数值计算模型

Fig.6 Diagram of numerical calculation model

表1 地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

材料	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	粘聚力 c/kPa	弹性模量 E/MPa	刚度参数/MPa			泊松比 μ
					E_{50}^{ref}	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	
粉质黏土	19.03	17.9	29.6	—	5.78	5.78	17.34	0.30
黏质粉土	19.09	22.7	16.3	—	7.59	7.59	22.77	0.25
粉质黏土	19.55	22.8	60.8	—	7.80	7.80	23.40	0.33
强风化砂岩	25.70	35.1	5.7	120	—	—	—	0.16
中风化砂岩	26.31	33.6	8.2	110	—	—	—	0.18

表2 结构属性参数

Table 2 Parameters of structural properties

类别	厚度 d/m	材料重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	材料属性	杨氏模量 $E_1/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	泊松比 μ_{12}	剪切模量 $G_{12}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$
盾构机	0.35	120	线性	2.3×10^7	0.0	1.15×10^7

3.2 实测与数值模拟结果对比分析

图7为不同阶段建筑物实测沉降值与数值模拟结果对比,选取盾构开挖面到达建筑物位置时和盾构隧道施工完成后这两个时间点的建筑物监测点累计沉降值与数值模拟结果进行对比分析。实测点数据选取与盾构隧道轴线方向平行的建筑物侧边监测点JCJ55、JCJ56,以及与盾构隧道轴线方向垂直的侧边监测点JCJ57、JCJ58、JCJ59。图7水平坐标轴的测点位置将其定义为各监测点与测点JCJ55的水平或垂直距离。由图7可以看出,盾构施工掘进到达建筑物位置时实测值与数值模拟结果吻合较好。而盾构施工完全结束后,数值模拟结果比实测沉降值稍大一些,这是由于数值模型对隧道掘进做了一些简化。

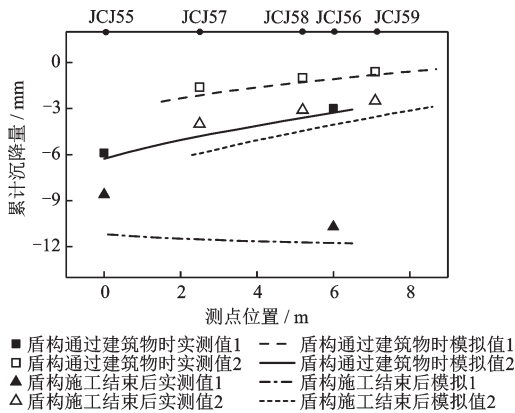


图7 数值模拟和实测结果对比

Fig.7 Comparison between simulated and measured results

3.3 建筑物差异沉降模拟分析

差异沉降是造成建筑物结构破坏的重要原因,因此与建筑物单个测点的沉降相比,建筑物的差异沉降更应值得关注。图8直观地描绘了盾构隧道施工结束后建筑物基础的最终沉降情况,建筑物基础的差异沉降较为明显。基础四个角点处的沉降值 $S_D \approx S_A > S_C \approx S_B$,建筑物整体向隧道方向倾斜并有一定程度的扭曲变形。图9给出了隧道开挖不同阶段基础各角点沉降量和不同角点间沉降差的变化曲线。由于盾构开挖面首先到达建筑物角点A和B所在截面,而角点A更靠近隧道,所以随着盾构开挖面逐渐靠近,角点A位置先发生沉降,同时各角点间的沉降差即建筑物的差异沉降量也显著增大;在盾构隧道侧穿建筑物阶段,建筑物最大差异沉降

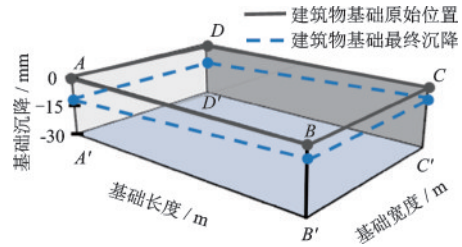


图8 建筑物基础最终沉降情况

Fig.8 Final settlement of the building's foundation

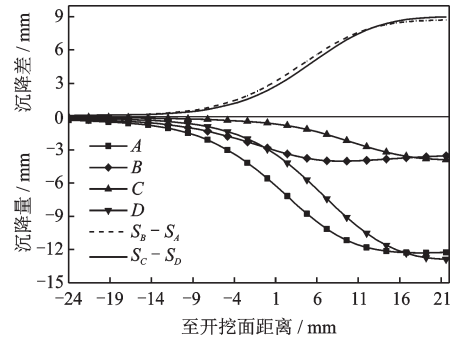


图9 建筑物各角点沉降量与沉降差

Fig.9 Settlement and differential settlement at each corner of the building

量达到8.89 mm。盾构隧道开挖面远离建筑物之后,建筑物各角点沉降量及角点间沉降差趋于稳定。

3.4 建筑物扭曲变形模拟分析

建筑物基础差异沉降是基础不同位置沉降量的差值,而扭曲变形则是描述整个基础平面的变形。在盾构隧道施工过程中,如果建筑物基础平面两对边之间的差异沉降不同,即两个对边的旋转角度有差值,建筑物基础平面将会产生扭曲变形,建筑物基础的扭曲变形将直接导致上部结构的受力变形与损伤开裂。因此,研究建筑物基础平面内的扭曲变形有助于认识盾构隧道施工对建筑物变形的影响。

目前关于扭曲变形还没有统一的数学定义及量化表征和计算方法,本文采用丁祖德等^[15]的定义与计算方法,建筑物扭曲变形定义为:所考虑平面的两个对边旋转角度之差随其距离的变化率。图10为建筑物扭曲变形示意,计算公式见式(1):

$$T_w = \frac{\Delta\theta}{\Delta x} = \frac{\theta_b - \theta_a}{\Delta x} = \frac{(S_{b2} - S_{b1}) - (S_{a2} - S_{a1})}{\Delta x \Delta y} \quad (1)$$

式中, θ_a 、 θ_b 分别表示 $a_1 - a_2$ 、 $b_1 - b_2$ 旋转的角度; S_{a1} 、 S_{a2} 、 S_{b1} 、 S_{b2} 分别表示角点 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 对应的沉降量;

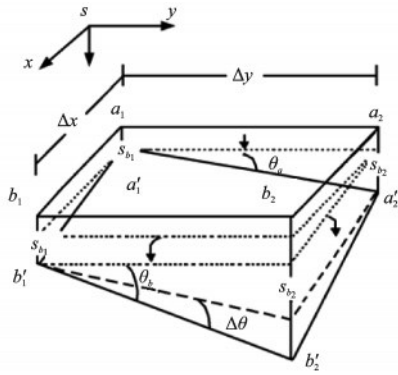


图10 建筑物扭曲变形示意^[15]

Fig.10 Twist deformation schematic diagram of the building^[15]

Δx 表示边 a_1-b_1 长度; Δy 表示边 a_1-a_2 的长度。当 $\theta_a=\theta_b$ 时, $\Delta\theta=0$,表明各点处在同一平面,没有发生扭曲变形;当 $\theta_a\neq\theta_b$ 时, $\Delta\theta\neq 0$,表明各点已经不处于同一平面内,即基础发生扭曲变形。

图11为盾构开挖面至建筑物不同距离时建筑物基础的扭曲变形曲线。由图11可知,盾构开挖面至建筑物距离大于16 m时,建筑物基本不产生扭曲变形。随着盾构开挖面逐渐接近建筑物,建筑物扭曲变形值大幅增加;当盾构掘进至建筑物中心截面位置时,建筑物的扭曲变形达到最大值,最大值为 $5.88\times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$;之后建筑物的扭曲变形迅速减小,最终建筑物的扭曲变形趋于稳定。

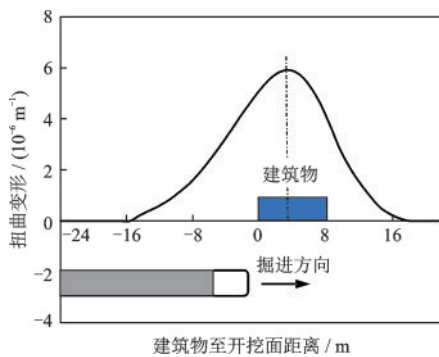


图11 建筑物扭曲变形曲线

Fig.11 Twist deformation curve of the building

4 不同影响因素分析

4.1 隧道与建筑物水平距离影响分析

盾构隧道施工对附近地层的扰动程度可根据距离远近分为不同的影响区域,建筑物所在地层受

到的施工扰动又直接影响着建筑物变形特征。对此分别取建筑物中心至隧道轴线的水平距离与隧道外径之比 $L/D=0,0.5,1,1.5,2,3,4,5$,研究盾构隧道轴线至建筑物中心不同水平距离时建筑物的沉降变形规律,计算结果如图12、13所示。可以明显看出,由于建筑物的存在,地表沉降曲线不再对称分布,建筑基础所在区域的地表沉降曲线发生了显著变化。当 $L/D=0$ 时,则隧道位于建筑物正下方,建筑物区域内的地表沉降几乎相同,此时建筑物整体可以看作均匀下沉;当 $L/D=0.5$ 时,地表最大沉降量达到峰值,沉降量为12.77 mm,建筑物发生倾斜;当 $L/D=1$ 时,地表最大沉降为12.55 mm,建筑物基础的差异沉降继续增大,建筑物继续向隧道侧倾斜;当 $L/D=1.5$ 时,建筑物基础差异沉降量达到峰值,此时建筑物易发生倾斜开裂现象,在实际施工时需加强监测并根据实际情况调整盾构参数,保证壁后注浆的质量并及时进行二次注浆。当 $L/D=2\sim 3$ 时,建筑物最大差异沉降量从6.26 mm大幅降低至2.91 mm,建筑物受到盾构隧道施工的影响在此距离范围内将迅速减小。 $L/D=4\sim 5$ 时,地表最大沉降量基本保持稳定,建筑物差异沉降基本趋于0,建筑物可看作均匀沉降,表明在此距离下

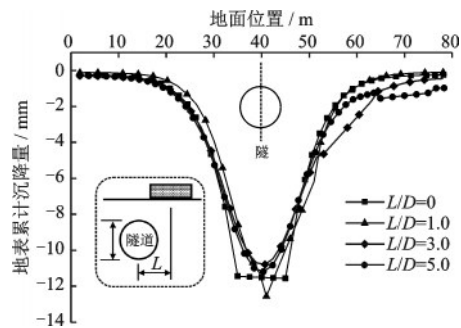


图12 不同 L/D 时地表沉降曲线

Fig.12 Surface settlement curves at different L/D ratios

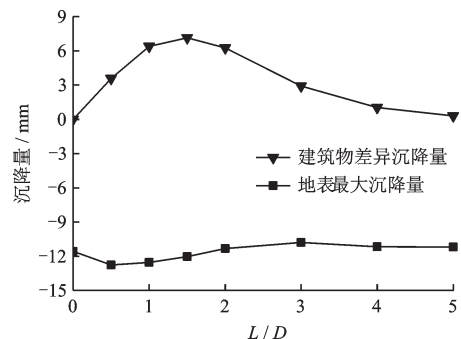


图13 不同 L/D 时差异沉降与地表最大沉降

Fig.13 Differential settlement and maximum surface settlement at different L/D ratios

建筑物基本处于安全状态。

4.2 隧道与建筑物夹角影响分析

盾构穿越建筑物的角度对建筑物沉降特征及受力分布也有很大影响^[21-22],因此当盾构侧穿建筑物的角度不同时,建筑物的差异沉降与扭曲变形也将有所差异。将盾构隧道的中心轴线与建筑物纵向的夹角定义为建筑物与隧道的夹角。当 $\theta=0^\circ$ 时,建筑物纵向与隧道掘进方向平行,当 $\theta=90^\circ$ 时,建筑物纵向与隧道掘进方向垂直,如图14所示。为研究盾构穿越夹角的影响,设置 $\theta=0^\circ、30^\circ、45^\circ、60^\circ、90^\circ$ 五种不同的工况。

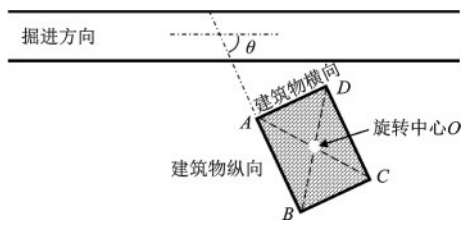


图14 隧道与建筑物夹角示意

Fig.14 Schematic diagram of the angle between the tunnel and the building

建筑物基础纵向侧边 CD 在不同工况下的差异沉降曲线如图15所示。随着盾构开挖面的不断接近,纵向侧边 CD 的差异沉降不断增大,除垂直穿越外,其它工况的差异沉降量都是逐渐增大至峰值,之后开始有不同程度的下降。建筑物的最大差异沉降量随着盾构穿越夹角的增大而增加,且差异沉降曲线达到峰值后其回落大小也与盾构穿越夹角相关。当盾构穿越夹角为 90° 时,建筑物纵向侧边最大差异沉降量为 9.22 mm ,之后基本保持稳定。当盾构穿越夹角为 0° 时,最大差异沉降量为 3.84 mm ,约为垂直穿越工况时的 41.65% ,而且盾构施工完成后差异沉降量大幅减小。这是由于盾构隧道平行穿越侧边 CD ,角点 D 先于角点 C 发生沉降,在盾构开挖面刚到达建筑物时差异沉降达到最大,但盾构施工完成后两角点各自累计沉降量比较接近,故最终差异沉降量很小。

图16反映了不同盾构穿越夹角时基础的最终扭曲变形情况,当穿越夹角为 0° 或 90° 时,基础侧边与隧道掘进方向垂直或平行,几乎不发生扭曲变形。当盾构隧道斜穿建筑物时,盾构掘进施工引起的建筑物扭曲变形非常明显。当穿越夹角从 0° 逐渐增加时,建筑物最终扭曲变形先增大后减小。当盾

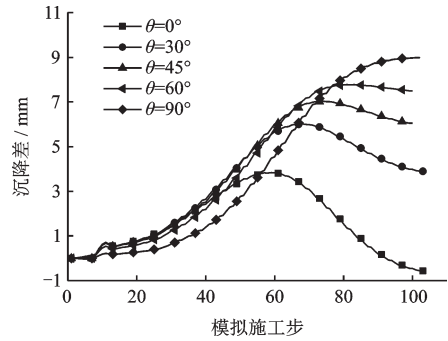


图15 不同穿越夹角时基础差异沉降曲线

Fig.15 Differential settlement curves of the foundation at different crossing angles

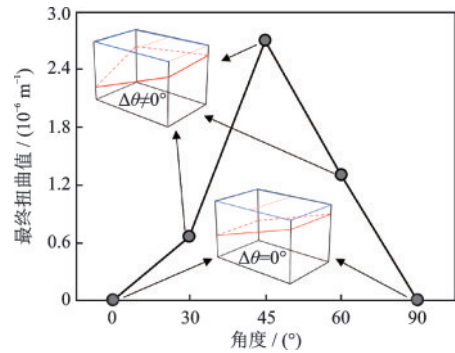


图16 不同穿越夹角时基础最终扭曲变形

Fig.16 Final twist deformation of the foundation at different crossing angles

构穿越夹角为 45° 时,基础的最终扭曲变形达到最大,最终扭曲变形值为 $2.687 \times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$ 。当盾构穿越夹角为 60° 和 30° 时,对应的扭曲变形值分别为 $1.298 \times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$ 和 $0.660 \times 10^{-6}\text{ m}^{-1}$,只有 $\theta=45^\circ$ 时扭曲变形值的 48.31% 和 24.56% 。因此盾构隧道与建筑物夹角接近 45° 时,在盾构施工过程中需格外注意扭曲变形导致的建筑物破坏问题。

5 结论

本文以南京地铁一号线北延段为工程背景,对某一浅基础建筑物沉降变形实测成果进行分析,并从隧道中心轴线至建筑物中心不同距离和盾构施工穿越建筑物不同夹角两个方面展开分析,探究盾构隧道侧穿浅基础建筑物对其差异沉降与扭曲变形的影响。主要结论如下:

(1)盾构施工侧穿建筑物的整个过程中,基础差异沉降的时间效应和空间效应显著。随着盾构开挖面接近建筑物,建筑物的差异沉降与扭曲变形逐渐增大,在盾构开挖面到达建筑物中心截面位置

时,建筑物的扭曲变形达到峰值;当盾构开挖面通过建筑物后,扭曲变形量逐渐减小,最终趋于稳定。

(2)建筑物差异沉降和扭曲变形受到盾构穿越建筑物夹角与距离的共同影响,当 L/D 逐渐增大时,建筑物最大差异沉降量先增大后减小,在 $L/D=1.5$ 时达到最大值,当 $L/D \geq 5$ 时,建筑物的差异沉降影响基本可以忽略。

(3)盾构穿越夹角从 0° 逐渐增加时,建筑物最大差异沉降量不断增加,而基础最终扭曲变形先增大后减小,在 $\theta=45^\circ$ 时建筑物最终扭曲变形达到最大。在实际工程中需注意盾构隧道以接近 45° 夹角侧穿浅基础建筑物的工况,应加强监测,并及时调整盾构施工参数或提前对建筑物进行加固。

参考文献:

- [1] Fang Y, Yang Z H, et al. Prediction of surface settlement process based on model shield tunnel driving test [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(10): 7787-7796.
- [2] 戴旭,赵少飞,孙嵩,等.隧道穿越距离变化对地表框架结构变形的影响[J].防灾减灾工程学报,2018,38(3):480-486,497.
- Dai X, Zhao S F, Sun S, et al. Influence on deformations of a ground frame structure by a tunnel crossing at different distances [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 480-486, 497. (in Chinese)
- [3] Yang Y Y, Li H A. Failure mechanism of large-diameter shield tunnels and its effects on ground surface settlements [J]. Journal of Central South University, 2012, 19(10): 2958-2965.
- [4] 石波,李科.隧道邻近建筑物影响分区研究及工程对策分析[J].隧道建设,2021,41(增2):230-235.
- Shi B, Li K. Influence zoning of buildings adjacent to tunnel and engineering countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(Sup2): 230-235. (in Chinese)
- [5] 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 J, Wu K, Zheng Y, 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)
- [6] 张学民,董宗磊,冯涵,等.隧道超前注浆对既有建筑物影响现场测试分析[J].地下空间与工程学报,

2021, 17(1): 204-213, 289.

Zhang X M, Dong Z L, Feng H, et al. Field test and analysis of the Influence on the existing building by advanced grouting in tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 204-213, 289. (in Chinese)

- [7] 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 X, Guo W, Cheng X S, et al. Field measurement and numerical analysis for evaluating longitudinal settlement induced by shield tunnelling parallel to building [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(1): 233-244. (in Chinese)

- [8] 李涛,崔远,刘波,等.岩-土复合地层隧道施工引起建筑物沉降计算[J].华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(3):86-91.

Li T, Cui Y, Liu B, et al. Analytical solution of building settlement caused by underground tunnel construction in soil-stone composite stratum [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(3): 86-91. (in Chinese)

- [9] 谢雄耀,张永来,周彪,等.盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术研究[J].岩土工程学报,2019,41(10):1781-1789.

Xie X Y, Zhang Y L, Zhou B, et al. Micro-settling control technology for shield tunnels crossing old buildings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(10): 1781-1789. (in Chinese)

- [10] 欧阳文彪,丁文其,谢东武.考虑建筑刚度的盾构施工引致沉降计算方法[J].地下空间与工程学报,2013,9(1):155-160.

Ouyang W B, Ding W Q, Xie D W. Calculation-method for settlement due to shield tunnelling considering structure stiffness [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 155-160. (in Chinese)

- [11] 丁智.盾构隧道掘进对邻近建筑物影响及变形预测研究[D].杭州:浙江大学,2014.

Ding Z. Prediction of deformation and study on the influence of shield tunnel on adjacent buildings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)

- [12] Schuster M, Kung T C, Juang C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835.

(本文编辑:张艺)

(下转第477页)