

TBM 下穿施工对邻近建筑物影响分析

赵明春¹, 张永娟², 李树光¹, 孔德森², 李锁在¹

(1.中铁三局集团第四工程有限公司, 北京市 102300; 2.山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘 要:以青岛地铁2号线TBM隧道下穿建筑物为背景,通过数值模拟,对TBM隧道施工影响下建筑物及地表变形规律进行了深入研究。结果表明:下穿2栋相邻砖混结构建筑物时,引起的地表及建筑物的最大沉降并未出现在两隧道中心线处;地表沉降最大值会向较高大建筑物所在处偏移;建筑物的最大沉降值出现在2栋建筑物相邻位置处,对于存在凹凸不规则的建筑物,最大沉降值会向凸出部分所在处和相邻建筑物所在处这两个方向的叠加方向偏移;下穿框架结构建筑物时,地表中独立基础所在处会出现沉降峰值,距离隧道越近,峰值越大,砖混结构所采用的条形基础并未对地表沉降产生此种影响;在远离隧道一侧会出现隆起现象,距隧道超过一定距离,建筑物隆起量会趋于一个定值。

关键词:隧道工程;数值模拟;隧道下穿建筑物;地表沉降;建筑物沉降

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0256-04

0 引言

目前,国内外大量学者对隧道下穿建筑物的影响进行了深入研究,研究方法有理论分析^[1]、数值模拟^[2]、试验研究^[3]、现场实测^[4]分析等。

戴轩等^[5]以实际工程为背景,通过现场实测数据分析和三维有限元数值模型,研究了盾构平行穿越引发的建筑物空间变形规律,并分析了不同建筑物平面长宽比的影响;魏纲等^[6]通过分析现场实测沉降数据,研究了双线盾构隧道施工对不同位置、不同结构建筑物沉降规律的影响;路平等^[7]采用三维数值模拟分析和现场监测验证的方法,研究了平行双线隧道的穿越形式对砌体建筑物沉降与倾斜规律的影响;孙鹤明等^[8]利用数值模拟与现场监测的方法,对复合地层双线TBM隧道施工影响下单栋建筑物的变形及力学特性进行了研究。

研究隧道下穿对上部建筑物产生的影响已有较丰富的成果,但目前研究大多只针对上部单栋建筑物的变形影响规律,其结构形式较为简单,而在实际穿越工程中往往会遇到穿越不规则建筑物和建筑物紧邻的情况,相邻建筑物之间通常会互相影响,使建筑物的变形规律不同于单栋建筑物。另外,目前在隧道下穿对上部建筑物的影响研究成果中,有关盾构机在砂土、粉土、软岩地层中施工对上部建筑物的影

响研究相对较多,而对于双线TBM隧道在复合地层中施工对建筑物的影响研究还不多见。

本文以青岛地铁2号线工程为背景,利用有限元软件分别建立了双线隧道下穿2栋相邻且不规则的砖混结构建筑和斜下穿1栋框架结构建筑的三维数值模型,分析了2类建筑物的存在对地表沉降的影响规律和TBM下穿施工引起的建筑物沉降变形规律,以为类似工程施工提供依据。

1 工程概况

区间线路出青岛轮渡有限公司南侧轮渡站后,下穿七八一一厂6栋1~3层厂房,建筑物无地下室,但厂内有大量精密仪器,对变形控制要求较高。地层条件由上到下依次为素填土、强风化花岗岩上亚带、强风化花岗岩下亚带、中等风化粗粒花岗岩、微风化粗粒花岗岩,TBM在微风化花岗岩中掘进。

隧道与建筑物的平面位置关系图、剖面关系图见图1、图2。

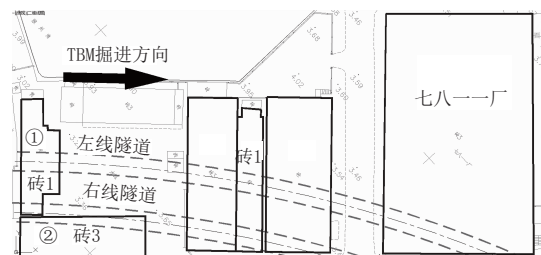


图1 隧道与建筑物平面位置关系图

2 数值模拟方案确定

根据本段工程特点,建筑物下穿模拟选取砖混建

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 中铁三局集团有限公司科研项目(K20-重大-01)

作者简介: 赵明春(1981—),男,本科,高级工程师,主要从事隧道与地下工程研究工作。

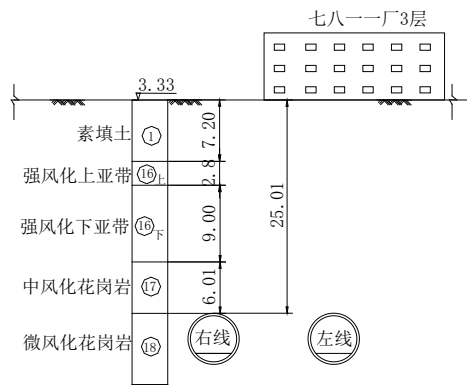


图 2 隧道与建筑物剖面关系图(单位:m)

筑①、②和 3 层框架结构建筑物这 3 栋建筑来进行,分别建立 2 个模型。模型 1 为建筑物①、②的下穿模拟,如图 3 所示;模型 2 为 3 层框架结构建筑的下穿模拟,如图 4 所示。此处地层变化不大,为简化计算,选取相同地层参数。

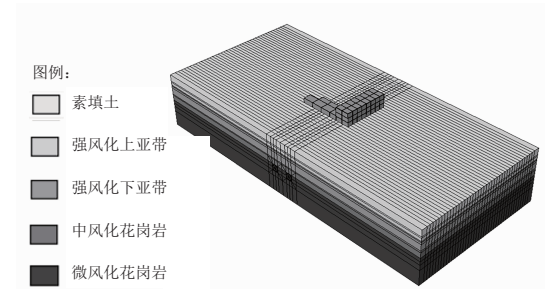


图 3 模型 1 砖混结构整体图

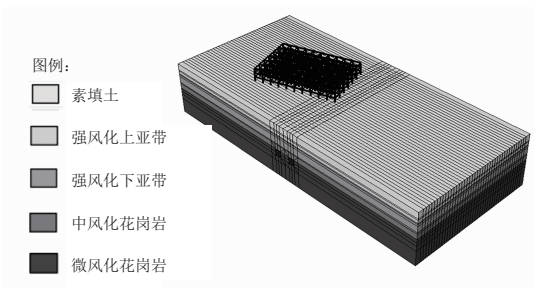


图 4 模型 2 框架结构整体图

模型中假设地层为均质,因地层中节理裂隙较少,岩层渗透性较差,忽略岩石中的渗流,主要分析下穿扰动对建筑物的影响。

取模型 1 和模型 2 的土体尺寸为:沿隧道开挖方向 130 m、沿隧道横向 280 m、竖直方向 50 m,故土体尺寸为 280 m×130 m×50 m,地层材料采用摩尔-库伦本构模型。

建筑物①、②分别为 1 层和 3 层砖混结构建筑,基础形式为条形基础;七八一一厂 3 层框架结构建筑的基础形式为柱下独立基础,建筑物采用弹性模型。框架结构建筑物因其梁柱为主要受力构件,因此框架结构采用线单元,并赋予相应的截面尺寸。砖混结构建筑物采用实体单元。

在施工过程中,对于盾尾空隙、土体向盾尾空隙的自然填充及注浆后浆体的分布情况等这些影响围岩稳定性的因素往往是难以量化的,因此将它们概化为均质、等厚、弹性的等代层,其中等代层的厚度取盾壳厚度、超开挖间隙、操作空间这三者加和后的折减值,以等代层来模拟 TBM 壁后注浆。

数值模拟方案中各部件物理力学参数见表 1。

表 1 各部件物理力学参数

名称	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 / MPa	泊松比	摩擦角 / ($^{\circ}$)	黏聚力 / kPa
素填土	1.80	8.5	0.40	12	10
强风化上亚带	2.50	85	0.24	33	200
强风化下亚带	2.50	150	0.23	38	500
中风化花岗岩	2.52	7 000	0.22	44	3 500
微风化花岗岩	2.57	10 000	0.12	55	4 780
TBM	7.50	10 000	0.30		
衬砌	2.50	35 000	0.20		
等代层	2.10	24 000	0.20		
框架结构	2.50	30 000	0.20		
砖混结构	2.00	4 300	0.20		
条形基础	2.40	20 000	0.25		

衬砌和反映施工质量的等代层采用弹性模型,衬砌外径 6 m,等代层外径 6.3 m。

TBM 取主机长度 13 m,将 TBM 自重等效为盾壳的密度,对 TBM 部件赋予相应的密度参数,材料等效为刚体;TBM 每次掘进长度为 3 m,开挖直径 6.3 m;TBM 开挖顺序与实际开挖顺序保持一致。

模型荷载考虑各部件的自重。考虑 TBM 自重,框架结构建筑物的墙体荷载及其活荷载均等效为相应的均布荷载;考虑各层墙体和楼板自重,墙体密度为 2 000 kN/m^3 ,施加在相应的主次梁上,活荷载大小为 2.5 kN/m^2 。

3 数值计算结果分析

模型 1 监测路径如图 5(a)所示。地表监测路径沿隧道横向取 C1、C2。建筑物监测路径为 E1、E2、E3;H1、H2、H3;F1、F2、F3;K1、K2、K3。

模型 2 监测路径如图 5(b)所示。地表监测路径沿隧道横向取 D1、D2。建筑物监测路径为 L1、L2、L3;W1、W2、W3。

3.1 地表沉降分析

为了研究建筑物的存在对地表沉降的影响,分别提取地表监测路径 C1、C2、D1、D2 数值模拟数据,绘制地表沉降曲线如图 6 所示。

由图 6 可见,C1 的沉降曲线与 D1 保持一致,并

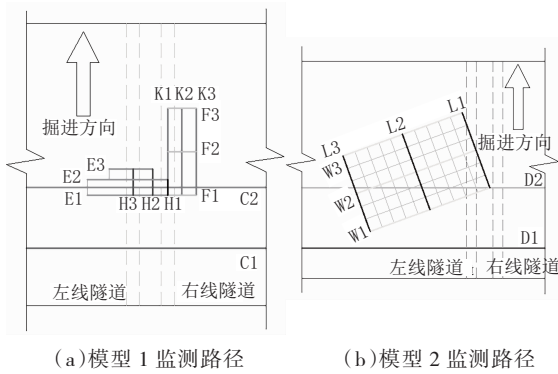


图 5 监测路径

且符合地表沉降规律,地表最大沉降发生在两隧道中心线处,地表沉降最大值为 1.26 mm。

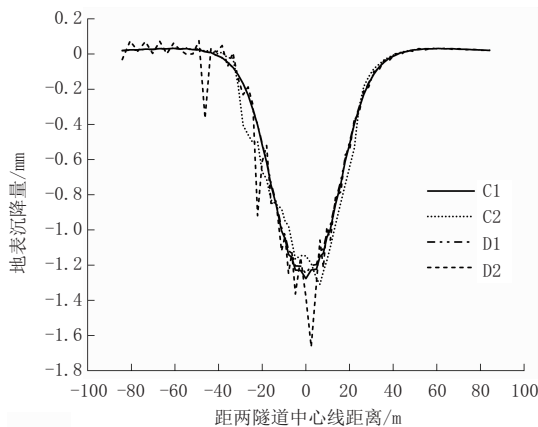


图 6 沿隧道纵向地表沉降曲线

在 TBM 下穿建筑物阶段,由 C2 和 D2 曲线可见,在 C2 曲线中,在距隧道中心线 -29 m 处,地表沉降值开始出现大于未下穿阶段的趋势,地表沉降的最大值未发生在两隧道中心线处,向两砖混结构建筑物中较大的建筑物所在处偏移,下穿阶段地表沉降最大值主要受较高大的建筑物影响。在 D2 曲线中,在距离隧道中心线 -70 m 到 20 m 范围内,地表沉降曲线出现激荡性的变化,且在距隧道中心线 -46 m、-22 m、-11 m、-8 m、-4 m、2.5 m 处出现峰值。初步分析认为,由于框架结构采用独立基础,在独立基础附近,因基础与土体的相互作用会出现应力集中现象;对于条形基础而言,其抗弯刚度较大,对于调节地基不均匀沉降的能力较强,因此,在模型 1 的地表沉降曲线中没有出现如模型 2 地表沉降曲线的激荡变化。模型 2 的地表沉降最大值发生在距隧道中线最近的框架结构基础附近,为 1.66 mm。

3.2 建筑物沉降分析

3.2.1 相邻砖混结构建筑物沉降分析

TBM 下穿 2 栋相邻砖混结构的变形云图见图 7,建筑物沉降变形曲线见图 8、图 9。

由图 7 可见,最大沉降值发生在建筑物相邻位

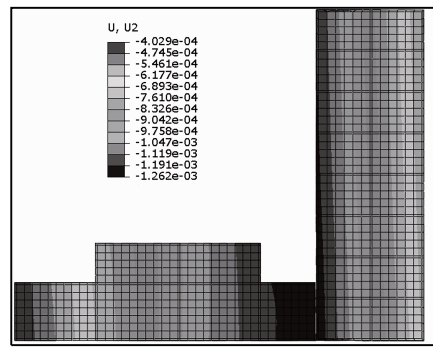


图 7 建筑物竖向变形俯视图(单位:m)

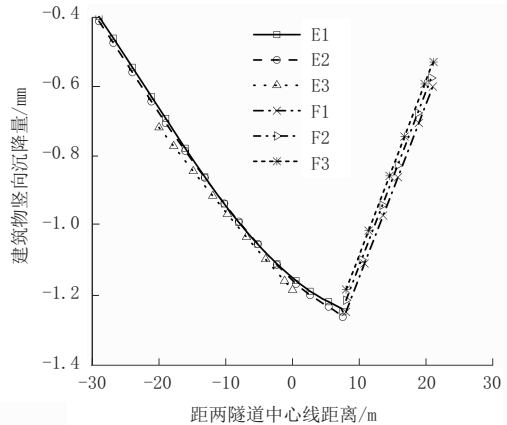


图 8 沿隧道横向建筑物沉降曲线

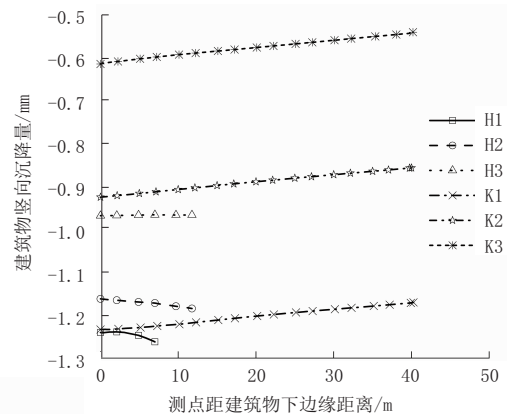


图 9 沿隧道纵向建筑物沉降曲线

置处。由图 8 可见,对于凹凸不规则的建筑物①,在 E1、E2、E3 观测路径的沉降曲线中,距离隧道越近的位置沉降量越大,最大沉降并未发生在两隧道中心线位置,而是发生在与建筑物②相邻的区域,这与图 6 中地表沉降最大值位置相对应。虽然 E1、E2 和 E3 观测路径的沉降曲线变化趋势保持一致,但在发生最大沉降处,E2 观测路径的沉降值大于 E1,而在 F1、F2、F3 观测路径中没有此种现象发生。初步分析由于建筑物①为凹凸不规则建筑,建筑物最大沉降位置受到凸出部分与相邻建筑物的双重影响,最大沉降位置向两叠加的矢量方向偏移,大小为 1.28 mm。对于建筑物②,由观测路径 F1、F2、F3 的沉降曲线也可见,沉降值 $F1 > F2 > F3$,最大变形发生在与建筑

物①相邻位置处。

由图9可见,对于不规则建筑物①,在H1、H2、H3观测路径中,随建筑物测点与建筑物下边缘距离的增加,建筑物沉降值增大,即建筑物沉降值受凸出部分一侧影响,3条路径的沉降值均有向凸出部分一侧增大的趋势。同时可以发现H1、H2、H3曲线的斜率均为负值,倾斜程度 $H1 > H2 > H3$,这表明H1位置处(即两建筑物相邻位置处)的建筑物沉降值更容易受到建筑物凸出部分的影响,出现沉降不均匀现象;沉降值 $H1 > H2 > H3$,也表明建筑物最大沉降值出现在两建筑物相邻位置。对于规则建筑物②,在K1、K2、K3观测路径中,K1、K2、K3斜率均为正值,大小大致相同,建筑物②的沉降值随着图9横坐标的增大而减小,即距相邻建筑物越远,其沉降值越小。

3.2.2 框架结构建筑物沉降分析

TBM下穿框架结构的建筑物沉降曲线见图10。

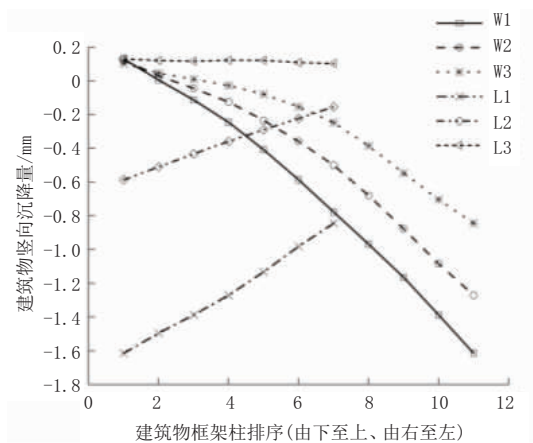


图10 建筑物沉降变形曲线

由图10可见,在靠近隧道一侧,框架柱的沉降值要明显大于远离隧道一侧,在W1、W2、W3观测路径中,建筑物最右侧框架柱均出现了纵坐标大于零的情况,因此在远离隧道一侧的框架柱有隆起现象出现;斜率 $W1 > W2 > W3$,在W1路径中建筑物竖向沉降值变化最激烈,在W3路径中建筑物竖向沉降值变化最平缓,这说明越靠近隧道一侧,建筑物沉降越大,相应的其另一侧隆起也越大,引起建筑物不均匀沉降的程度也越剧烈;在L3观测路径中,所有框架柱都存在隆起现象,且变化范围不大,由此分析,距隧道超过一定距离后,建筑物的隆起量会趋于一个定值。TBM开挖引起建筑物最大沉降值为1.61 mm,

最大隆起值为0.13 mm。

在实际工程施工中,对于较细长与跨度较大的建筑,要关注其不均匀沉降带来的危害。

4 结 语

(1)TBM下穿2栋相邻砖混结构建筑物时,地表沉降的最大值未发生在两隧道中心线处,而向两砖混结构建筑物中较高大的建筑物所在处偏移,下穿阶段地表沉降最大值主要受较高大的建筑物影响。TBM下穿单栋框架结构建筑物时,在下穿阶段,建筑物基础所在位置会出现地表沉降峰值,且距隧道越近,峰值越大。

(2)模型1建筑物所采用的条形基础较模型2建筑物所采用的独立基础,其抗弯刚度较大,对于调节地基不均匀沉降的能力较强,因此,在受到隧道开挖扰动时,条形基础的抗变形能力要优于独立基础。

(3)对于凹凸不规则的建筑物,建筑物最大沉降值会向凸出部位所在处和相邻建筑物所在处这两个方向的叠加方向偏移。对于形状规则建筑物,其最大沉降值位置会出现在与另一建筑物相邻处。

(4)对于细长框架结构建筑物,在远离隧道一侧建筑物出现隆起现象,靠近隧道一侧建筑物出现沉降,建筑物隆起值随着与隧道距离的增大而增大,沉降值随着与隧道距离的增大而减小,距隧道超过一定距离后,建筑物的隆起量会趋于一个定值。

参考文献:

- [1] 张治国,张成平,奚晓广.双线隧道不同布置方式下相互作用影响的地层位移解析[J].岩土工程学报,2019,41(2): 262-271.
- [2] 姜晓婷,路平,郑刚,等.天津软土地区盾构掘进对上方建筑物影响分析[J].岩土力学,2014,35(增刊2): 535-542.
- [3] 史林肯,周辉,宋明,等.深部复合地层TBM开挖扰动模型试验研究[J].岩土力学,2020,41(6):1933-1943.
- [4] 丁祖德,彭立敏,施成华.地铁隧道穿越角度对地表建筑物的影响分析[J].岩土力学,2011,32(11): 3387-3392.
- [5] 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.
- [6] 魏纲,叶琦,虞兴福.杭州地铁盾构隧道掘进对建筑物影响的实测分析[J].现代隧道技术,2015,52(3):150-159.
- [7] 路平,耿艳,张稳军,等.平行隧道穿越形式对砌体建筑变形的影响研究[J].隧道建设,2019,39(1): 60-67.
- [8] 孙鹤明,汪强宗,张磊,等.复合地层双线TBM隧道施工对临近建筑物影响[J].地下空间与工程学报,2016,12(增刊2): 733-738.