

# 富水圆砾地层盾构隧道施工对地表及建筑物影响分析

任建喜 郑康龙

(西安科技大学建筑与土木工程学院, 710054, 西安//第一作者, 教授)

**摘要** 以在富水圆砾地层的盾构双线隧道先后通过邻近建筑物为研究背景, 通过现场监测和数值计算方法, 对双线隧道施工引起地表及既有建筑物变形规律进行研究。研究结果表明, 随着地层深度增加, 沉降槽宽度减小; 地表最大沉降量出现在先行隧道中线上方; 刀盘通过地表中心断面后, 地表及建筑物沉降逐渐趋于稳定; 当偏离比在一定范围内, 随着建筑物与隧道间距减小时, 建筑受到的影响逐渐增大。

**关键词** 盾构隧道; 沉降差; 现场监测

**中图分类号** TU433; U456.3

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2020.01.004

## Influence of Shield Tunnel Construction in Water-rich Gravel Stratum on Surface and Buildings

REN Jianxi, ZHENG Kanglong

**Abstract** The adjacent buildings of twin-track shield tunnel in water-rich gravel stratum are taken as the research background. Through on-site monitoring and numerical value calculation method, the deformation of the surface and existing buildings caused by twin-track tunnel construction is studied. The results show that as the depth of formation increases, the width of the settlement tank will decrease, the maximum settlement of the surface will appear above the mid-line of the first tunnel. The surface and building settlement will tend to be stable after the cutter-head passing through the surface central section. When the deviation ratio is within a certain range, the impact on buildings increases as the distance between the building and tunnel decreases.

**Key words** shield tunnel; settlement difference; on-site monitoring

**Author's address** School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, 710054, Xi'an, China

随着我国城市轨道交通的日益发展, 地铁建设逐渐成为我国城市地下空间开发的重点<sup>[1]</sup>。盾构法施工速度快、对周边环境影响较小, 在城市地下

隧道施工中得到了广泛推广。由于城市地下隧道施工多在市区, 其周围建筑物、管线密布, 施工环境复杂, 故施工难度大, 且对周边建筑物的安全和正常使用有影响。

文献[2]通过数值计算比较了采用不同施工工法对桥桩基变形的影响; 文献[3]分析了单线隧道侧穿建筑物时对建筑物沉降的影响; 文献[4]总结了双线隧道施工对浅基础建筑物沉降的影响规律; 文献[5]对隧道与邻近建筑物不同位置工况进行了有限元二维数值模拟, 分析了建筑物在不同位置工况所受的影响。

南宁市轨道交通2号线某区间盾构法施工的双线隧道位于富水圆砾地层, 在旁穿邻近的广西轻工设计院办公楼时会对周边土层及建筑物产生影响。本文采用有限差分法进行数值模拟, 将整个地铁隧道施工看成一个动态平衡的过程, 预测研究地铁隧道盾构施工在不同阶段对周边土层及建筑物的影响。

## 1 工程背景

### 1.1 工程概况

南宁市轨道交通2号线某地铁双线隧道区间, 总长588.48 m, 盾构外径为6 180 mm, 线间距为16.0 m~16.9 m, 隧道埋深为11.4~16.4 m。双线隧道采用先后土压平衡盾构施工方式进行, 并配备换刀和防喷涌装置; 先施工左线, 后施工右线。广西轻工设计院办公楼楼房为地下1层、地上11层的全现浇钢筋混凝土剪力墙结构, 其平面尺寸为10.5 m×15.5 m, 其筏板基础厚度为0.9 m。隧道与建筑物的位置关系见图1。

### 1.2 工程地质及水文地质条件

本区间场地内地势起伏不大且位于为邕江低阶地, 分布有厚状圆砾层, 富水性好、透水性好、水量大、略具承压性。隧道主要穿越圆砾层, 其上方土层依次为杂填土、素填土、粉质黏土、粉土、粉

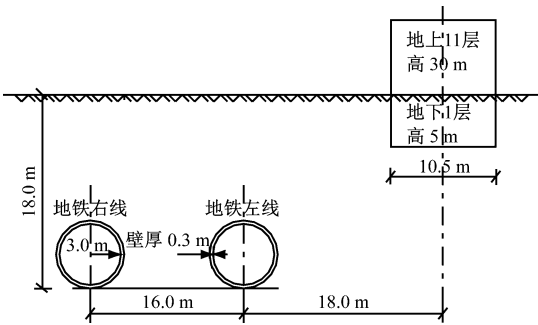


图 1 区间隧道与办公楼剖面示意图

表 1 岩、土体物理力学参数

编号	地层	厚度/m	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	密度/ (kg/m³)
1	杂填土	0.7	11.2	0.33	10.0	8.0	1 850
2	素填土	3.1	16.1	0.32	12.0	12.0	1 950
3	粉质黏土	4.7	17.6	0.30	42.0	12.0	1 970
4	粉土	1.7	14.4	0.35	8.0	19.0	2 030
5	圆砾	14.0	37.6	0.27	2.0	35.0	2 050
6	泥岩及粉砂质泥岩	10.9	39.5	0.24	90.0	37.4	2 080

强烈影响区范围内,由道路中线向两边对称布设。建筑物基础的监测点位于楼房外墙转角高约 0.5 m 处。D1、D2、D3 断面及现场监测点布置如图 2 所示。

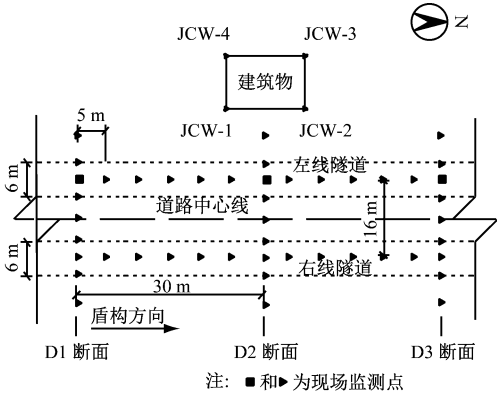


图 2 区间隧道和办公楼平面监测点

2.2 计算模型

本文采用 FLAC3D 有限差分软件进行计算。模型地下部分沿隧道横向取 70.0 m,沿隧道纵向取 60.0 m,高度取 36.0 m;广西轻工设计院办公楼高度取 32.0 m,其地下基础埋深为 5.0 m;故计算模型尺寸为 70.0 m×60.0 m×68.0 m。计算网格单元如图 3 所示。

模型中:岩土体材料按弹塑性理论并符合摩尔-库仑准则;盾构隧道的管片采用壳单元;高层建筑

细砂、砾砂,其下方土层为粉砂质泥岩。最大地质勘察深度为 41.5 m,水位埋深为 4.3~18.0 m,标高为 56.66~72.17 m。各地层物理力学参数见表 1。

2 监测方案的制定及数值计算

2.1 现场监测方案

参考《广州市轨道交通地下工程施工监测技术规程》,隧道正上方两侧 0.7 H(H 为底板埋深)水平距离内为强烈影响区。本项目监测点主要布置在

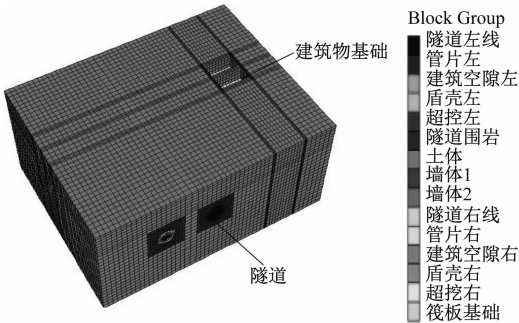


图 3 FLAC3D 三维计算模型

物及筏板基础采用弹性体三维实体单元,力学行为符合胡克定律。

2.3 边界条件和模型参数

模型边界条件为:前后及两侧约束水平移动;底面边界约束水平和竖向位移;模型上边界为地表,其为自由边界。地下水位取 -4.5 m。根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》,每层楼的荷载标准值为 2.0 kN/m²。

为使模拟过程更接近实际施工过程,采用 2 组环形单元体近似代替隧道管片和壁后注浆,其厚度分别为 300 mm 和 125 mm。注浆压力在模拟过程中一般选择 0.2 MPa。支护力的大小通常应与其开挖面静止土压力近似平衡,本次模拟取值为 0.21 MPa。结构单元的力学参数如表 2 所示<sup>[6]</sup>。

表 2 结构单元的力学参数

结构单元	弹性模量/MPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	泊松比
管片	35.5×10 <sup>3</sup>	2 500	0.25
注浆层	2.57	1 000	0.29
建筑物基础	25.0×10 <sup>3</sup>	2 400	0.25

2.4 盾构法施工模拟

隧道盾构法施工模拟过程与实际施工进度一致,均为左线施工完成后再施工右线。

首先,令开挖的单元格为 Null 单元,采用“刚度迁移法”进行应力释放;同时,在掌子面施加推进压力,使之与地层侧压力基本保持平衡,并取该值作为控制掌子面稳定性的简单判断标准;然后,根据实际工程注浆层参数硬化情况,将开挖环前第 4 环的注浆层作为初次硬化状态,将开挖环前第 8 环的注浆层作为最终硬化状态;最后,在恒定支护力状态下,模拟地铁隧道盾构开挖,激活管片单元,完成地层土应力的释放。

该隧道模型沿盾构掘进方向总长 60.0 m,分为 40 步开挖,每施工步长 1.5 m。

3 现场监测与计算对比分析

3.1 地层变形特征分析

3.1.1 地层沉降规律

D2 断面不同深度处的沉降计算值和相应位置地表沉降实测值如图 4 所示。

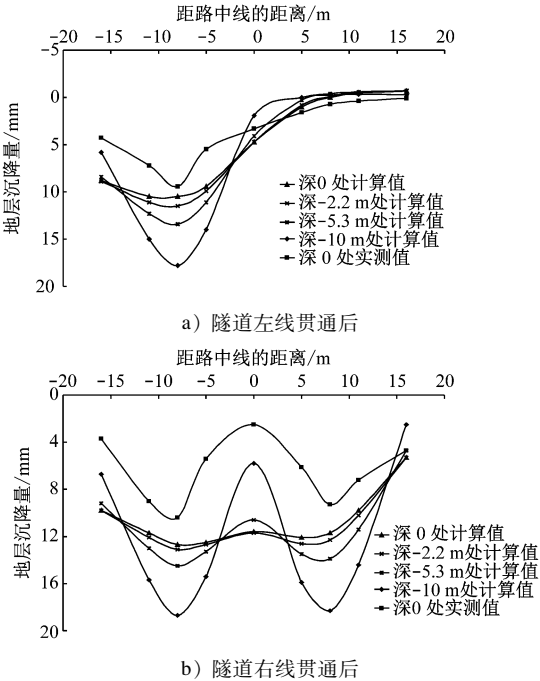


图 4 D2 断面的沉降

由图 4 可见,左线开挖完成后,随着地层距拱顶的距离增大,最大沉降量逐渐减小,最小沉降量逐渐增大,沉降槽宽度增加,曲线整体趋于平缓。经分析,随着右线隧道的开挖,使得原有左线隧道围岩受到二次扰动。因此,隧道开挖完成后,左线隧道围岩各个地层最大沉降量均大于右线隧道。

由对比结果可见,数值计算结果能够较好地反应盾构施工引起的地表竖向沉降规律,说明通过数值计算来预测地表沉降是行之有效的。

3.1.2 地表纵向沉降规律

不同开挖阶段各断面地表沉降实测值与计算值如图 5 所示。受计算量限制,在数值计算仅考虑距掌子面 60 m 范围监测点的沉降。

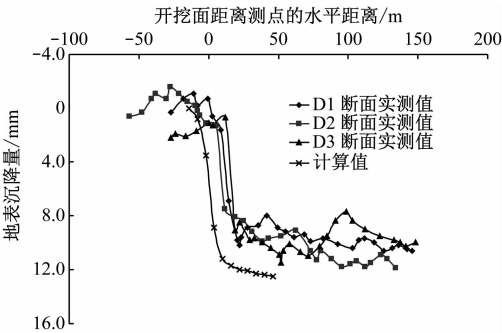


图 5 不同开挖阶段各断面地表沉降实测值与计算值

由图 5 可见,盾构隧道施工期间地表沉降大致可划分为三个阶段:①在盾构通过前,为地表隆起阶段,由于盾构机实际推力大于静止土压力,地表土体局部隆起,沉降量约占总沉降量 20%;②盾构通过期间,为地表沉降阶段,土层受到扰动程度大、沉降速率大,沉降量约占总沉降量的 70%;③当盾构刀盘通过 D2 断面后,土体沉降趋于稳定阶段,土体沉降主要是固结蠕变残余变形沉降,盾构施工对该处地表影响变小。数值计算结果无法体现第一阶段地表沉降变化。这说明即使支护力参数取值合理性,在隧道实际施工中完全达到掌子面平衡也是难以实现的。

3.2 建筑物基础沉降

建筑物监测点的实测沉降曲线见图 6。当隧道盾构施工到达建筑物之前时,监测点均出现不同程度上浮现象;随着盾构刀盘的推移,由于筏板基础自身刚度较大,建筑物远端监测点出现上浮,而近端监测点出现沉降;当刀盘完全穿越建筑物后,各监测点的沉降随着时间推移逐渐趋于稳定。

由现场实测数据可知,该建筑物不同监测点处

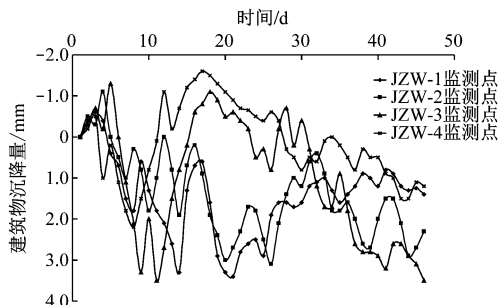


图 6 建筑物沉降曲线

的最大沉降差为 3.5 mm, 倾斜值(倾斜方向两端点的沉降差与其距离的比值)为 0.23‰。建筑物基础竖向沉降位移云图如图 7 所示。

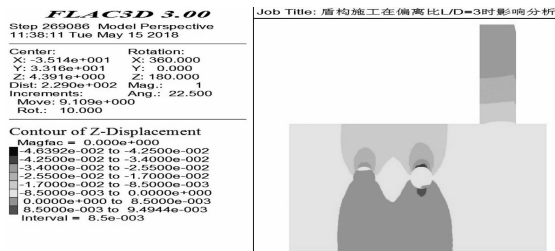


图 7 隧道施工完成后竖向位移云图

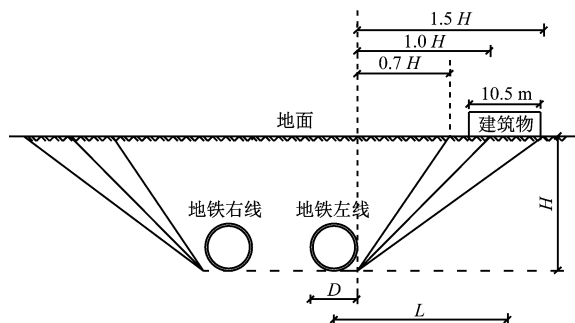
在数值计算中, 假定平行于隧道方向墙体为纵墙, 则产生最大倾斜率为沿建筑物横墙方向。计算得到, 最大沉降差为 4.5 mm, 最大倾斜值为 0.43‰。

由文献[7]可得, 建筑物的沉降差允许值为 31.5 mm, 倾斜允许值为 3.00‰。

计算结果表明, 建筑物倾斜值数值计算结果与实测结果相近, 采用数值计算法评估建筑物的正常使用和安全性是合理可靠的。

#### 4 隧道与建筑物相对位置变化的影响

建筑物与隧道相对位置关系可简化为图 8。



注:  $L$  为隧道轴线与建筑物轴线的水平间距;  $D$  为盾构外径

图 8 建筑物与隧道空间位置关系示意简图

$L/D$  为偏离比, 用于表述建筑物与隧道的相对

位置。当  $L/D$  变化时, 隧道盾构施工引起的地表影响规律如图 9 所示。

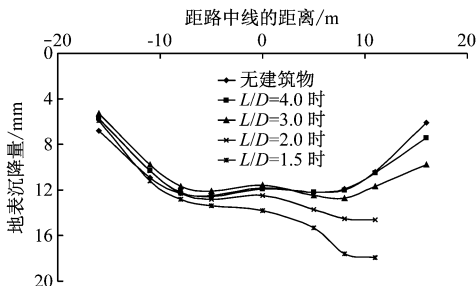


图 9 不同偏离比下的地表沉降量

由图 9 可见: 随着  $L/D$  的减小, 地表沉降曲线呈非轴对称分布, 在建筑物基础附近处的地表沉降量呈非线性增长, 地层滑移角及沉降槽宽度增加明显。当  $L/D = 1.5$  时, 引起地表沉降量最大, 最大沉降量为 18.1 mm; 当  $L/D = 2.0$  时, 引起地表最大沉降量为 14.6 mm;  $L/D = 3.0$  时, 地表最大沉降量为 12.7 mm; 当  $L/D = 4$  时, 隧道施工对建筑物的影响基本上可忽略。

进一步分析可知, 盾构隧道开挖后, 建筑物的存在使得地表横向沉降曲线近似呈“压弯的 W 形”分布; 当  $L/D = 4.0$  时, 建筑物最大沉降差为 3.15 mm, 倾斜值为 0.3‰; 当  $L/D = 2$  时, 建筑物的最大沉降差为 6.7 mm, 倾斜值为 0.63‰; 当  $L/D = 1.5$  时, 建筑物的最大沉降差 12.9 mm, 倾斜值为 1.23‰。对比不同工况下的建筑物倾斜值发现, 随着建筑物与隧道之间间距的减小, 倾斜值增加, 建筑物受到的影响逐渐增大, 且建筑物始终处于安全状态。

#### 5 结语

本文对比有限差分法数值计算结果和实测数据, 分析了双线隧道盾构施工与邻近建筑物位置关系不同时的相互影响, 总结了地层变形特征, 对建筑物安全性进行评价。得到以下结论:

1) 隧道开挖完成后, 各地层沉降曲线变化很大。随着地层深度增加, 沉降槽宽度减小, 最大沉降量增大, 且出现于偏向隧道左线一侧。

2) 盾构刀盘到达前, 地表土体沉降曲线均出现先隆起且最终总体沉降的趋势; 盾构通过阶段, 地表沉降曲线变化显著; 当盾构通过 D2 断面后, 地表沉降量逐渐减小并最终趋于稳定, 且稳定阶段历时

(下转第 26 页)

## 参考文献

- [1] HUANG Y C, PAN H. Short-term prediction of railway passenger flow based on RBF neural Network[J]. The Fourth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, 2011(4):594.
- [2] 姜桂艳, 常安德, 牛世峰, 等. 基于 BP 神经网络的交通数据序列动态可预测性分析方法[J]. 北京工业大学学报(自然科学版), 2011(7):1019.
- [3] 冯金巧, 杨兆升, 孙占全, 等. 基于小波分析的交通参数组合预测方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(5):1220.
- [4] CHEN Q, LI W Q, ZHAO J H. The use of LS-SVM for short-term passenger flow prediction [J]. Transport, 2011, 26(1):5.
- [5] WANG X M, ZHANG N, ZHANG Y L, et al. Forecasting of Short-Term Metro Ridership with Support Vector Machine Online Model [J]. Journal of Advanced Transportation, 2018(1678):1.
- [6] WEI Y, CHEN M C. Forecasting the short-term metro passenger flow with empirical mode decomposition and neural networks[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2012, 21(1):148.
- [7] 徐世鹏. 城市轨道交通站点客流不确定性机理及预测研究[D]. 南京:东南大学, 2016.
- [8] 徐世鹏, 张宁, 邵星杰. 城市轨道交通站点客流不确定性研究[J]. 都市轨道交通, 2015, 28(3):12.
- [9] CHEN M C, WEI Y. Exploring time variants for short-term passenger flow[J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(4):488.
- [10] KAMARIANAKIS Y, KANAS A, PRASTACOS P. Modeling traffic volatility dynamics in an urban network[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2006, 1923(1):18.
- [11] SOHN K, KIM D. Statistical model for forecasting link travel time variability [J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(7):440.
- [12] TSEKERIS T, STATHOPOULOS A. Real-time traffic volatility forecasting in urban arterial networks[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 1964(1):146.
- [13] GUO J, WILLIAMS B M. Real-time short-term traffic speed level forecasting and uncertainty quantification using layered kalman filters[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2010(1):28.
- [14] TSEKERIS T, STATHOPOULOS A. Short-term prediction of urban traffic variability: stochastic volatility modeling approach [J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(7):606.
- [15] MARTCHOUK M, MANNERING F, BULLOCK D. Analysis of freeway travel time variability using bluetooth detection[J]. Journal of Transportation Engineering, 2011, 137(10):697.
- [16] VLADIMIR N, VAPNIK. The nature of statistical learning theory[J]. Technometrics, 1996, 8(4):1564.

(收稿日期:2018-05-18)

(上接第 17 页)

较长。

3) 由于建筑物的存在,当偏离比逐渐减小时,地表沉降槽宽度和地层滑移角逐渐增加,沉降曲线呈非对称分布。

4) 在地铁隧道近距离穿越筏板基础过程中,当  $L/D \geq 1.5$  时,盾构法施工隧道与建筑物之间距离为安全距离。这是由于筏板基础自身刚度较大,能对控制最大沉降差起到较好调节作用。

## 参考文献

- [1] 钱七虎. 迎接我国城市地下空间开发高潮[J]. 岩土工程学报, 1998(1):112.
- [2] 任建喜, 杨锋, 贺小俐, 等. 地铁隧道暗挖施工引起的桥桩基础

变形规律与控制技术[J]. 城市轨道交通研究, 2016(9):110.

- [3] 姜忻良, 贾勇, 赵保建, 等. 地铁隧道施工对邻近建筑物影响的研究[J]. 岩土力学, 2008(11):3047.
- [4] 李超人, 周传波, 陈东, 等. 双线盾构施工引起地表及建筑物沉降规律研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017(6):108.
- [5] 魏新江, 魏纲, 丁智. 盾构施工与邻近不同位置建筑物相互影响分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊1):505.
- [6] 李涛, 陈慧娴, 刘波, 等. 双线隧道盾构施工对临近高层建筑物的影响分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(4):43.
- [7] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(收稿日期:2018-04-27)