

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.06.016

# 节理岩体中连拱隧道施工对周边建筑物的影响

李亚勇<sup>1</sup>, 王芳其<sup>2</sup>, 靳晓光<sup>1</sup>, 罗 维<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;  
2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400060)

**摘 要:**以重庆东水门大桥—千厮门大桥渝中区连接隧道为研究对象, 基于 UDEC 软件建立离散元数值模拟分析模型, 研究了城区连拱隧道施工引起的地表沉降, 上部建筑物基础沉降及倾斜, 新建隧道下方已有轨道六号线的变形、受力特征, 并将监测数据与数值模拟进行对比分析。结果表明, 连拱隧道左侧隧道上导坑施工引起的隧道拱顶沉降和基础沉降量最大, 经计算上部建筑物基础最大沉降量为 3.81 mm, 最大倾斜量为 0.02%, 建筑物基础沉降量和倾斜在规范许可范围之内; 隧道施工引起的地层损失使得轨道六号线左拱肩向上隆起, 六号线弯矩分布规律和其变形形态基本一致, 弯矩最大值位于左拱肩部位, 最大值为 238 kN·m; 数值模拟计算结果与监测数据量值相当, 变形趋势基本一致; 采用 UDEC 软件可以准确地计算出隧道开挖过程中节理的存在对隧道周围建筑物变形的影响。

**关键词:**节理岩体; 离散元; 隧道施工; 建筑物变形; 连拱隧道

**中图分类号:** U456

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2015)06-115-08

## Effect of multi-arc tunnel construction on buildings and subway in jointed rock mass

LI Yayong<sup>1</sup>, WANG Fangqi<sup>2</sup>, JIN Xiaoguang<sup>1</sup>, LUO Wei<sup>1</sup>

(1 a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China; 2. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co., LTD, Chongqing 400060, P.R.China)

**Abstract:** To study the effect of multi-arc tunnel construction on existing structures in jointed rock mass, Yuzhong connecting tunnel which locates in Chongqing, China is selected as a research object. A numerical model is established, and the two-dimensional discrete element analysis software UDEC is used, since it can reflect the influence of jointed rock mass. The settlement of tunnel crown, the foundation settlements of upper buildings and the deformation and stress characteristic of metro Line 6 caused by tunnelling are highlighted. In addition, the monitoring data are also analysed and compared to the results calculated by UDEC. The results of numerical analysis indicate that most of the settlements of tunnel crown and building foundations are caused by the excavation of upper bench in the left tunnel. The maximum settlement is 3.81 mm with the maximum slope of about 0.02%. Both the settlement and the slope are within the range of

**收稿日期:** 2015-08-03

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51578091)。

Support by National Natural Science Foundation of China(51578091).

**作者简介:** 李亚勇(1990-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事岩土工程研究, (E-mail)269040798@qq.com。

靳晓光(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail)Jxgcqu@163.com。

the upper buildings, allowable change. The tunnel spandrel of metro Line 6 heaves upwards due to the loss of ground during the excavation of the new tunnel, and the bending moment of Line 6 distributes similarly with its deformation curve. The maximum bending moments is  $238 \text{ kN} \cdot \text{m}$  which locates in the tunnel spandrel and is within the typical capacity of the lining. Generally, the numerical results are in accordance with the monitoring data, which shows that UDEC can accurately reflect the effect of tunnelling on existing structures in jointed rock mass.

**Key words:** jointed rock mass; discrete element analysis; tunnelling; building deformation; multi-arch tunnel

近年来,越来越多基础设施的修建,使城市空间越来越狭窄。隧道在城市快速交通系统、污水管道、地下生命线等基础设施中发挥的作用越来越显著。城区隧道建设中,小净距隧道、新建隧道临近已有建筑物的情况经常发生。新建隧道不可避免的引起周围建筑物的变形,对已有临近建筑物产生不利的影响<sup>[1]</sup>。因此,隧道开挖对临近建筑物的影响是设计施工过程中的重要的问题。

目前,在较多经验公式和数值方法用于隧道开挖引起的地表沉降的预测<sup>[2-3]</sup>。经验方法和理论方法仅仅适用于“free-field”<sup>[4]</sup>或者“greed-field”<sup>[5]</sup>情况(即没有建筑物存在的情况),不能解决隧道和已有建筑物相互作用的问题。数值方法可以重现隧道周围的建筑物和地层情况,是分析新建隧道和已有建筑物相互作用的一个有力工具。

Gioda 等<sup>[6]</sup>对隧道工程中的数值方法进行了总结,有限元法可以考虑地层的不均质性和岩石的非线性,是一个公认的可以用于分析隧道开挖引起地表沉降的方法。王剑晨等<sup>[7]</sup>研究了北京地铁三号线宣武门站分离式双洞隧道近距离下穿既有二号线地铁车站。从整体变形和单个块体位移 2 个角度对既有车站实测位移进行分析,得出浅埋暗挖隧道进阶段施工分布开挖过程中上覆地铁结构的变形规律。张顶立等<sup>[8]</sup>结合厦门机场路隧道下穿地表复杂建筑群的工程实践,采用现场实测统计分析、数值模拟和理论分析方法,揭示隧道施工影响下地表建筑物的变形规律、变形破坏模式。漆泰岳<sup>[9]</sup>应用 FLAC3D 建立三维数值模型,对无或者有建筑物条件下的地层和建筑物沉降特征进行对比研究。李学峰等<sup>[10]</sup>采用三维有限差分数值分析方法对南线隧道施工引起北线隧道的变形和洞周土压力的变化规律进行了研究。蒋坤等<sup>[11]</sup>运用 UDEC 结合福州国际机场高速公路 2 期工程魁岐 2 号双洞八车道特大断面小净距隧道工程,针对节理岩体中特大断面小净距隧道施工方案进行了优化分析。

节理岩体与岩石的显著区别在于它是由结构面纵横切割而成的具有一定结构的多裂隙体,节理的存在破坏了岩体的连续性和完整性,从而大大改变了岩体的力学性质<sup>[12]</sup>。已有研究大多将节理岩体作为连续性介质来处理,不能充分考虑节理对工程的影响。为了研究节理岩体中连拱隧道施工对周围建筑物的影响,结合重庆市东水门大桥—千厮门大桥渝中区连接隧道,基于二维离散元软件 UDEC 建立渝中连接隧道离散元模型,研究城区连拱隧道施工过程中拱顶沉降曲线;隧道开挖引起的上部建筑物基础沉降及建筑物倾斜;下侧已有轨道六号线的变形、受力特征;并将数值模拟结果与监测数据进行对比分析。

## 1 工程概况及地质构造

### 1.1 工程概况

重庆东水门大桥—千厮门大桥渝中区连接隧道全段均位于渝中半岛内,隧道的地理位置,平面示意图及纵断面如图 1 所示。根据现场调查,渝中连接隧道南接东水门大桥,向西下穿陕西路、重庆轮船总公司、重庆市第一人民医院、道门口农贸市场、中国农业银行重庆市分行、新华路,拐向北西下穿筷子街、市消防一支队、民族路、重庆市中医院、嘉陵江索道楼、沧白路,终点与千厮门大桥连接。隧道全长 715 m,设计起点里程 K13+792,终点里程 K14+507,为单线双洞隧道,设计隧道宽 9.9 m,隧道高 6.6 m,明挖段采用矩形断面,暗挖段采用曲墙圆拱断面形式。渝中连接隧道在 K14+352~K14+378 段下穿华夏银行、重庆市第二中院门诊部,并与轨道六号线近距离相接;华夏银行基底与隧道间围岩厚度 2.3~3.4 m,第二中医院门诊部基底与

隧道间围岩最小厚度 5.3 m,轨道六号线与隧道之间间距 2.5~4.3 m;新建隧洞与周围建筑物的空间位置关系如图 2 所示。由此可见,隧道在 K14+352~K14+378 段周围建筑物众多且间距较小,隧道施工很有可能对周边建筑物造成不利影响。该段区域引起施工单位及业主方的高度重视,为主要研究区域。区域内主要建筑物分布及机构形式如表 1 所示。

表 1 研究区域主要建筑物特征

Table 1 The features of structures in the study area

建筑物	里程桩号	建筑层数	底层标高/m	基础形式	结构形式	基底标高/m
轨道交通六号线	K14+316~K14+507	隧道				
重庆市第二中院门诊部	K14+327~K14+347	7F	243.07	条形基础独立柱基	框架结构	236.67
华夏银行	K14+330~K14+378	14F/-1F	240.22	独立柱基	框架结构	236.30

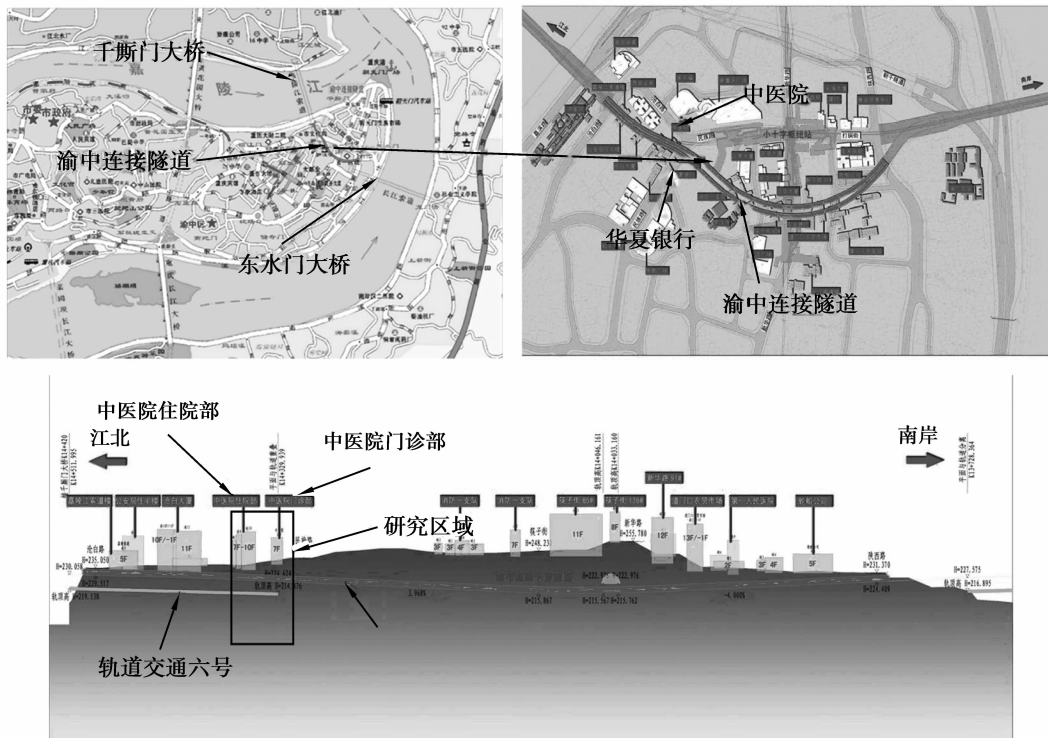


图 1 渝中连接隧道及其周围建筑物示意图

Fig.1 Location of Yuzhong connecting tunnel and buildings nearby

### 1.2 地质构造

地质勘察资料<sup>[13]</sup>表明:隧道场地位于解放碑向斜东翼,场地及周围无断层通过。岩层呈单斜状产出,其倾向 250°~300°,倾角 5°~10°。据调查和地勘报告资料,场地基岩中主要发育以下 2 组裂隙:

J<sub>1</sub>:倾向 15°~35°,倾角 70°~80°,张性,裂隙面平直,宽度 3~5 mm,有粘性土充填,裂隙间距 1~5 m 不等,延伸一般 3~5 m,最大延伸长度大于 10 m,结合差。

J<sub>2</sub>:倾向 290°~310°,倾角 70°~80°,压扭性,裂隙面较直,宽 2~4 mm,局部充填物粘土,延伸 2~5 m,裂隙间距 1~5 m 不等,结合差。

研究区域内隧道洞轴线总体走向 321°,隧道洞轴线与基岩中发育结构面的组合关系如图 3 所示。

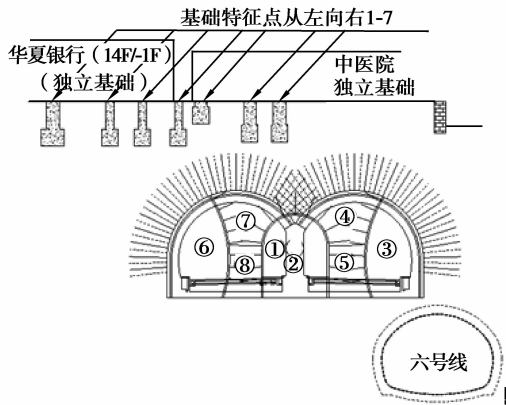


图 2 研究区域周围建筑物分布情况

Fig.2 Structures around tunnel in the study area

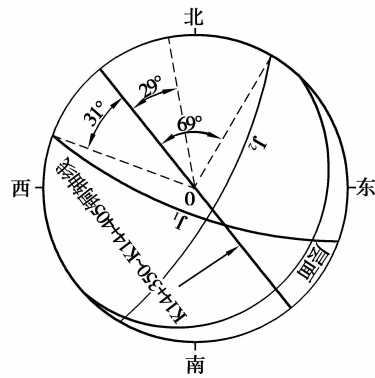


图 3 研究区域内隧道与岩体节理极射赤平投影图

Fig.3 Polar stereographic projection of tunnel and joints in the study area

## 2 离散元数值模拟

### 2.1 UDEC 简介

有限元软件将岩体作为均质体考虑,不能反映出岩体中节理对隧道周围建筑物变形的影响,二维离散元软件 UDEC 把研究区域分成相互独立的多边形块体单元,假设所有块体单元的接触只有面接触、并且单元与单元之间有角-边接触或边-边接触 2 种接触模式。块体单元既可以是刚性的,也可以是非刚性的;随着单元的平移或转动,各个单元之间的接触关系也将调整,块体单元最终达到平衡状态<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 数值模型建立

选取图 2 所示断面进行建模,研究区域内隧道上部有华夏银行和中医院,下部与轨道六号线近接,可以充分反映隧道施工对周围建筑物的影响。数值模型宽度在隧道两侧分别取 3 倍洞径,共 152 m;模型顶部视工程地势条件而定;模型底边界至隧道取 3 倍洞高,共 33 m(模型如图 4 所示),模型的左右 2 个边界采用水平位移约束,下部边界采用竖向位移约束,上部边界除施加的基础荷载外为自由面。隧道上方存在华夏银行(高层,14F)以及二中院门诊部(中高层,7F),建筑物均采用独立基础形式,基础材料为钢筋混凝土。为了充分反映隧道开挖对上部建筑物的不利影响,模型建立过程中没有考虑建筑物的整体效应,只将建筑物基础建立出来。基础上部荷载根据《建筑结构荷载规范》<sup>[16]</sup>取值,经计算,华夏银行基础荷载从左至右取为 3.4、3.3、3.3、3.0 MPa;二中院门诊部基础荷载从左至右取为 0.6、0.9、0.6 MPa。模型中块体采用摩尔库伦屈服准则,节理采用库伦滑移模型,初期支护采用梁单元进行模拟,锚杆采用锚杆单元进行模拟。模型共生成块体 1 139 个,网格 41 213 个,节点 29 600 个。

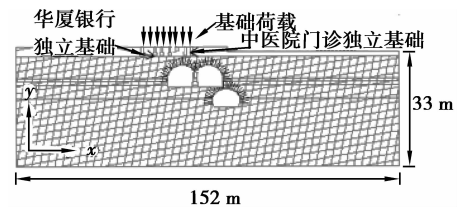


图 4 离散元计算模型

Fig.4 Numerical simulation model

数值模拟中隧道开挖支护步骤:①中导洞开挖、支护;②中隔墙施做;③右侧隧道上导坑开挖、支护;④右侧隧道上导坑开挖、支护;⑤右侧隧道下导坑开挖;⑥左侧隧道侧导坑开挖、支护;⑦左侧隧道上导坑开挖、支护;⑧左侧隧道下导坑开挖。每块开挖区域在隧道中所对应的区域如图 2 所示。

### 2.3 物理、力学参数选取

根据室内试验结果结合类似工程地勘资料<sup>[13]</sup>确定数值模型中岩石及节理的物理力学参数如表 2、3 所示。

表 2 岩石的物理力学参数

Table 2 The physical and mechanical parameters of rock

岩性	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/kPa	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	体积模量/GPa	剪切模量/GPa
砂岩	35	0.5	6.75	0.21	527	23	3.88	2.79
泥岩	27	0.2	1.57	0.36	249	21	1.87	0.58



表 3 节理的物理力学参数

Table 3 The physical and mechanical parameters of joints

节理	角度/(°)	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	内摩擦角/(°)	内聚力/kPa	抗拉强度/kPa	节理间距/m
J <sub>1</sub>	10	3.5	1.21	25	80	0.1	3
J <sub>2</sub>	80	3.5	1.21	20	60	0.1	3

### 3 计算结果分析

#### 3.1 围岩位移分析

隧道拱顶变形量较大,对隧道的稳定性影响较大。为了研究连拱隧道开挖时洞周围岩的变形情况,数值模拟中分别对中导洞隧道拱顶、右侧隧道拱顶、左侧隧道拱顶以及轨道六号线拱顶进行监测。隧道拱顶沉降随施工步骤的变化情况如图 5 所示。

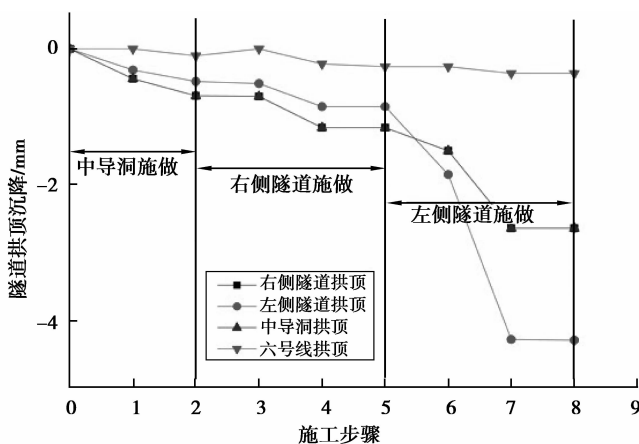


图 5 拱顶沉降随施工步骤变化曲线

Fig.5 The curve of vault settlement with construction steps

由图 5 可以看出,隧道施工引起六号线拱顶位移较小为 0.4 mm,右侧隧道及中导洞最终拱顶沉降为 2.7 mm,左侧隧道最终拱顶沉降为 4.3 mm;左侧隧道施工对隧道拱顶沉降影响最大,左侧隧道上导坑开挖引发的沉降值占其总沉降值的 60%以上。施工中应注意左侧隧道施工对拱顶沉降的影响。

#### 3.2 建筑物基础变形分析

华夏银行与中医院门诊楼独立基础位于隧道上方,与隧道之间距离在 4 m 左右。为了研究隧道开挖对建筑物变形的影响,数值模拟中对上部建筑物基础沉降进行监测(基础特征点如图 2 所示)。上部建筑物基础沉降随施工过程的变化情况如图 6 所示。图 7 反映了隧道开挖完成后建筑物基础沉降与隧道的相对位置关系以及建筑物的局部倾斜。

由图 6 可以看出,中导洞及右侧隧道施工对建筑物基础沉降影响较小;由于连拱隧道中左侧隧道与建筑物基础距离更近,隧道开挖引起的地层损失对上部建筑物的影响更大。经计算,左侧隧道施工引起的基础沉降量占总沉降量的 70%以上。基础点 5 沉降量最大 3.81 mm,基础点 1 沉降量约为 1.5 mm。

图 7 反映了隧道开挖后基础与隧道之间的空间位置关系,从图中可以看出基础点 1 距离隧道最远沉降量最小,基础点 5 位于左侧隧道上方沉降量最大,由于中隔墙的存在,基础点 6、7 的沉降量较基础 5 点沉降量小。

隧道开挖引起的华夏银行基础最大不均匀沉降量为 2.1 mm,由此计算其倾斜约为  $0.002 \ 1/12 = 0.000 \ 17$ ;隧道开挖引起的中医院门诊部基础最大不均匀 0.51 mm,经计算其倾斜约为  $0.000 \ 51/2.5 = 0.000 \ 2$ ;研究区域内 2 栋建筑物基础局部倾斜均远小于规范规定的 0.003,上部建筑物均处于稳定状态,新建隧道对上部建筑物的影响在可接受范围之内。

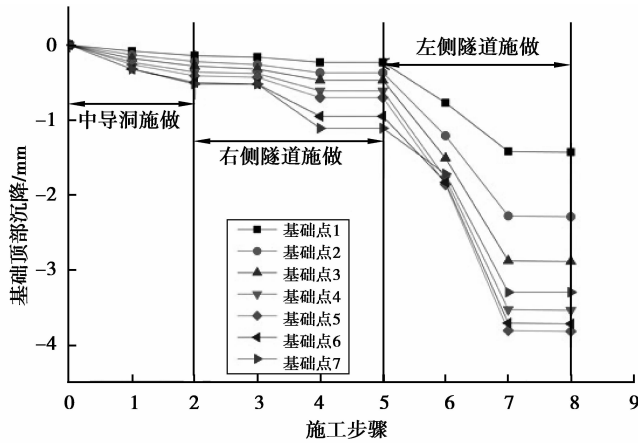


图 6 建筑物基础沉降随施工步骤变化曲线

Fig.6 The curve of foundation settlement with construction steps

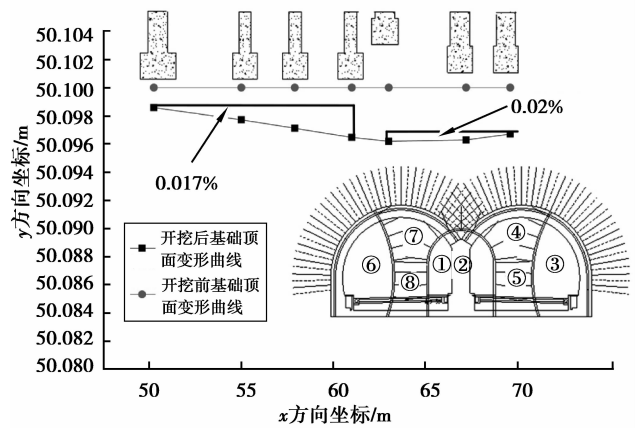


图 7 建筑物基础沉降曲线

Fig.7 The curve of foundation settlement

### 3.3 轨道六号线变形及受力分析

隧道与轨道六号线近距离相接,两者之间的间距仅为 2.5~4.3 m,隧道的开挖势必会对六号线衬砌结构的变形和受力形态造成一定影响。图 8 为隧道施工中轨道六号线位移扩大 1 000 倍之后的轮廓线与初始轮廓线。图 9 为隧道开挖完成后六号线衬砌的弯矩图。由图 8 可以看出轨道六号线二次衬砌的变化形态,受上部隧道开挖影响轨道六号线左侧呈现隆起,向上侧隧道移动。六号线衬砌弯矩图分布与变形分布较为一致,弯矩最大值位于隧道左侧拱肩部位,最大值为 238 kN·m;经计算轨道六号线衬砌极限承载能力为 560 kN·m,新建隧道引起的六号线弯矩远小于其承载能力,轨道六号线处于稳定状态。

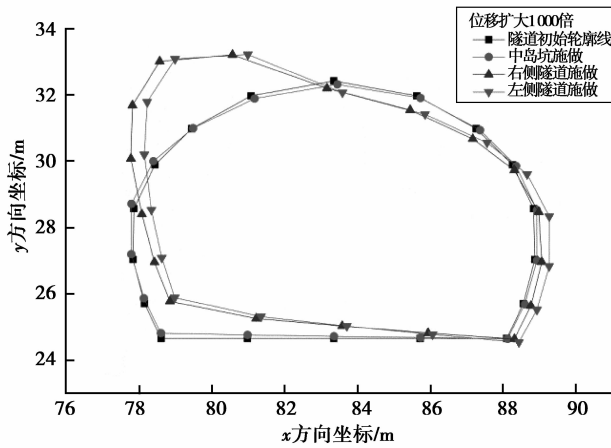


图 8 隧道施工过程中轨道六号线衬砌的变形图

Fig.8 Variation of exaggerated displacements of existing support system of metro line 6 during tunneling

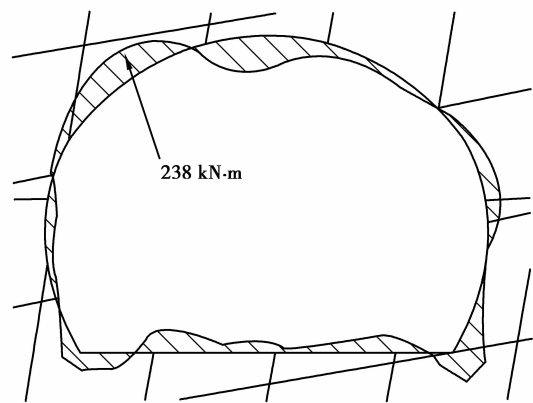


图 9 隧开挖完成后轨道六号线衬砌弯矩分布图

Fig.9 The bending moment of existing support system of metro line 6 after tunneling

## 4 监测数据分析

由于隧道上部建筑物较多,新建隧道与上部建筑物基础及下部既有轨道六号线距离很近。为了保证隧道施工的安全和顺利进行,控制隧道开挖对周边建筑物的影响,隧道施工过程中分别对隧道拱顶沉降、上部建筑物基础沉降以及六号线变形情况进行监测,以下选择研究区域对应断面监测数据进行分析(如图 10 所示)。

由图 10(a)与图 4 对比可以看出,右侧隧道拱顶沉降监测曲线与数值模拟变化曲线形态基本一致。右侧隧道拱顶沉降监测值约为 1.0 mm,数值计算约为 2.5 mm,监测位移比数值模拟值小,主要由于监测工作一般在初支完成后且掌子面开挖一定阶段后才开始进行,监测数据有部分损失。

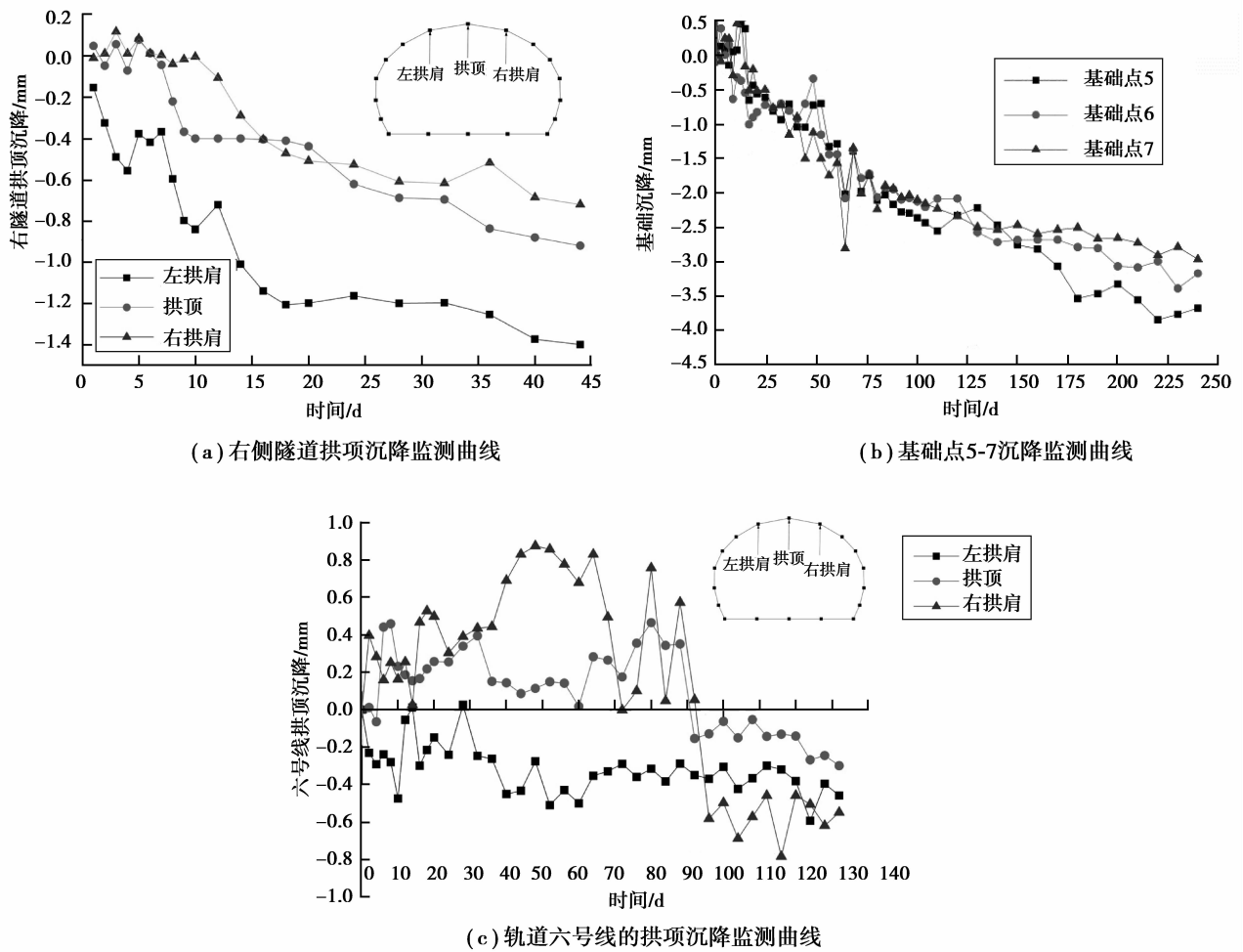


图 10 监测数据曲线  
Fig.10 The monitoring date of study area

由图 10(b)与图 5 可以看出,隧道上部基础点监测数据和数值模拟变化形态基本一致,基础点 5 沉降量最大,基础点 7 沉降量最小。通过基础 5-7 点的监测数据域数值结果对比(如图 11 所示)可以看出,数值计算结果与检测数据最大误差为 17.35%;由此可见,监测结果与数值模拟结果吻合得较好,采用 UDEC 可以较好地模拟出节理岩体中隧道开挖对周围建筑物的影响。

由图 10(c)可以看出,在 0~90 d 的监测时段内,轨道六号线左拱肩和拱顶均有隆起,这和图 7 的轨道轮廓线变形趋势保持一致;监测过程中受列车震动影响,监测数据在 ±1 mm 范围内波动,而离散元模拟结果为 -0.3 mm 左右,监测结果与数值模拟结果基本吻合。90~140 d 内由于六号线列车震动导致左侧拱肩和拱顶出现沉降,但最大值不超过 1 mm。隧道施工对轨道六号线影响较小。

### 5 结 论

1)左侧隧道施工对隧道拱顶沉降影响最大,左侧隧道上导坑开挖引发的沉降值占其总沉降值的 60% 以上。因此,左侧隧道施工中应降低开挖速率,及时支护,降低左侧隧道施工对拱顶沉降的影响。

2)隧道上部基础沉降量较大,基础点 5 沉降量最大,向两侧依次递减;隧道施工引起上部建筑物最大倾斜量为 0.000 2,小于规范规定的 0.003,隧道上部建筑物处于

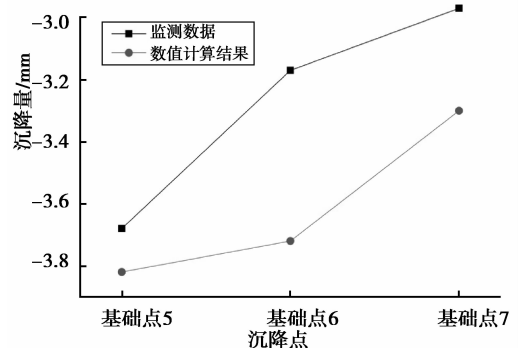


图 11 监测数据与数值模拟结果对比  
Fig.11 Comparison of monitoring data and numerical results

稳定状态,施工中所采用的开挖及支护方法较为可靠。

3)受上部隧道开挖的影响,轨道六号线左拱肩区域向上隆起;六号线衬砌最大弯矩也位于左侧拱肩区域;弯矩分布图与变形图基本一致,轨道六号线最大隆起量为 2.03 mm,轨道倾斜量为 0.01%;轨道六号线最大弯矩为 238 kN·m。由此可见隧道开挖引起轨道六号线的变形和弯矩均在允许范围内,隧道开挖对下部轨道六号线影响较小。

4)现场监控量测往往在隧道初期支护施做之后开始,监测数据有所损失,以至于隧道监测数据较数值模拟计算结果小。针对工程数值模拟计算结果与监测数据量值相当,变形趋势基本一致;采用二维离散元软件可以准确地反映隧道施工对隧道周围建筑物变形的影响,同时也说明数值模拟采用物理力学参数的正确性。

#### 参考文献:

- [1] Liu H Y, Small J C, Carter J P. Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, 23(4):399-420.
- [2] Peck R B. Deep excavation sand tunnelling in soft ground[J]. *Proc. 7th Int. Conf. on Smfe*, 1969(2):225-290.
- [3] O'reilly M P New, B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982:173-181.
- [4] Chen L T, Poulos H G, Loganathan N. Pile responses caused by tunneling [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1999, 125(3):207 - 215.
- [5] Franzius J N. Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence[D]. London: Imperial College of Science, 2003.
- [6] Gioda G, Swoboda G. Developments and applications of the numerical analysis of tunnels in continuous media [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 1999, 23(13):1393-1405.
- [7] 王剑晨,张顶立,张成平,等.浅埋暗挖隧道近距离施工引起的上覆地铁结构变形分析[J].*岩石力学与工程学报*,2014,33(1):90-97.  
WANG Jianchen, ZHANG Dingli, ZHANG Chengping, et al. Analysis of structural deformation of overlying subway station induced by approaching tunnel excavation in shallow depth [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(1):90-97. (in Chinese)
- [8] 张顶立,李鹏飞,侯艳娟,等.城市隧道开挖对地表建筑物群的影响分析及其对策[J].*岩土工程学报*,2010,32(2):296-302.  
ZHANG Dingli, LI Pengfei, HOU Yanjuan, et al. Influence due to urban tunnel excavation on ground buildings and its countermeasures [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(2):296-302. (in Chinese)
- [9] 漆泰岳.地铁施工引起地层和建筑物沉降特征研究[J].*岩土工程学报*,2012,34(7):1283-1290.  
QI Taiyue. Settlement characteristics of strata and buildings caused by metro tunneling[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(7):1283-1290. (in Chinese)
- [10] 李学峰,杜守继,张顶峰.新建盾构隧道施工对近接平行隧道的影响分析[J].*地下空间与工程学报*,2012,8(5):1065-1074.  
LI Xuefeng, DU Shouji, ZHANG Dingfeng. Analysis on Influence of New Shield Tunneling on Closely Spaced Parallel Tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(5):1065-1074. (in Chinese)
- [11] 蒋坤,夏才初,卞跃威.节理岩体中双向八车道小净距隧道施工方案优化分析[J].*岩土力学*,2012,33(3):841-847.  
JIANG Kun, XIA Caichu, BIAN Yuewei. Optimal analysis of construction schemes of small space tunnel with bidirectional eight traffic lanes in jointed rock mass[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(3):841-847. (in Chinese)
- [12] 胡威东.离散单元法在岩石隧道开挖中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2008.  
HU Weidong. A Study on the Application of Discrete Element Methods in Rock Tunnelling[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [13] 侯大伟.重庆东水门大桥一千厮门大桥渝中连接隧道工程地质详细勘察报告[R].重庆:重庆市勘测院,2009.  
HOU Dawei. Engineering geological investigation report of Yu-zhong tunnel which connects Dongshuimen bridge with Qiansimen bridge in Chongqing[R]. Chongqing: Chongqing Survey Institute, 2009. (in Chinese)
- [14] 朱成华.节理岩体隧道分析方法研究[D].重庆:重庆大学,2012.  
ZHU Chenghua. Study on Analysis Method of Tunnel in Jointed Rock Mass[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [15] Itasca Consulting Group, Inc. UDEC universal distinct element code(Version 4.00) user's guide[M]. Minneapolis, USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2005.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构荷载规范 GB50009-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012,5.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Load code for the design of building STRUCTURES GB50009-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012, 5. (in Chinese)