

# 盾构隧道下穿建筑物变形控制及预测研究

曹志勇<sup>1</sup>, 张清照<sup>2</sup>, 罗泽军<sup>2\*</sup>, 李自力<sup>1</sup>, 李五红<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原

<sup>2</sup>同济大学地下建筑与工程系, 上海

Email: \*1732643@tongji.edu.cn

收稿日期: 2020年9月29日; 录用日期: 2020年10月15日; 发布日期: 2020年10月22日

## 摘要

随着城市化进程的加快, 城市地铁隧道日益增加, 隧道下穿越建筑物的情况日益增长。当盾构隧道下穿越建筑物时, 容易导致地表的过度沉降, 进而影响周围建筑物的不均匀沉降造成建筑物开裂甚至发生倒塌。本文主要分析了隧道施工对建筑物的影响方式和扰动控制指标, 并以常州轨道交通2号线红梅公园站-五角场站下穿越建筑物为例, 分析了利用MIDAS/GTS NX进行数值模拟, 分析不同类型建筑物在隧道开挖过程中的沉降变化, 得到了如下结论: 1) 隧道施工对建筑物的影响方式主要包括地表不均匀沉降、地表曲率变化和地表水平变形三类; 2) 在隧道施工过程中, 土体受施工扰动的主要控制因素包括应力状态的改变、含水量及孔隙比的变化、土体结构性部分破坏和化学成分分离与混合四类; 3) 本工程隧道下穿越建筑物时, 随着离隧道中线距离增加, 沉降减小, 而隆起逐渐增加, 在整个开挖过程中, 地表变形呈现隆起-沉降-稳定的三阶段变化。

## 关键词

盾构隧道, 下穿建筑物, 数值模拟, 沉降控制, 三阶段变化

# Study on Control and Prediction of Building Deformation through Shield Tunnel Crossing Buildings

Zhiyong Cao<sup>1</sup>, Qingzhao Zhang<sup>2</sup>, Zejun Luo<sup>2\*</sup>, Zili Li<sup>1</sup>, Wuhong Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The 2<sup>nd</sup> Engineering Co., Ltd., China Railway 12<sup>th</sup> Bureau Group, Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai

Email: \*1732643@tongji.edu.cn

Received: Sep. 29<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 15<sup>th</sup>, 2020; published: Oct. 22<sup>nd</sup>, 2020

\*通讯作者。

文章引用: 曹志勇, 张清照, 罗泽军, 李自力, 李五红. 盾构隧道下穿建筑物变形控制及预测研究[J]. 土木工程, 2020, 9(10): 1047-1056. DOI: 10.12677/hjce.2020.910109

## Abstract

With the rapid development of urbanization, the number of subway tunnels in the city is increasing. When the shield tunnel across the building, it is easy to lead to the excessive settlement of the ground, which will affect the uneven settlement of the surrounding buildings and cause the building cracking or even collapse. This paper analyzes the influence mode and disturbance control index of tunnel construction on buildings. Taking Changzhou Metro Line 2 which crosses the buildings as the engineering background, and uses MIDAS/GTS NX for numerical simulation to analyze the settlement of different types of buildings during the tunnel excavation, the following main conclusions can be drawn: 1) The influence of tunnel construction on buildings mainly includes surface uneven settlement, surface curvature change and surface horizontal deformation; 2) During tunnel construction, the main controlling factors of soil disturbed by construction include the change of stress state, the change of water content and pore ratio, the failure of soil structure and the separation and mixing of chemical components; 3) In this project, when the tunnel across the building, the settlement decreases with the distance from the middle line of the tunnel increasing, while the uplift increases gradually. During the whole excavation process, the surface settlement shows three stages of uplift, subsidence and stability.

## Keywords

Shield Tunnel, Crossing Building, Numerical Simulation, Settlement Control, Three-Stage Deformation

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国社会的高速发展,城市化水平越来越高,城市地铁隧道的建设日益增长。在城市中进行地铁盾构隧道开挖时,容易导致地表的过度沉降,进而影响周围建筑物的不均匀沉降造成建筑物开裂甚至发生倒塌,对周围的建筑物造成重大的安全隐患[1],如南京地铁1号线施工过程中,造成了邻旁一幢房屋变形开裂,其中最大裂缝宽度达到20 mm [2]。因此,对盾构隧道下穿越建筑物施工引起的地面变形和沉降控制进行研究具有重要的意义。

目前,盾构下穿越建筑物施工引起的地面变形和沉降研究主要基于监测数据和数值模拟开展。Peck [3]在总结和分析大量监测数据的基础上,得出了地层位移是由地层损失引起的,提出了地表横向沉降量经验公式。尹旅超等[4]整理了适用于地铁的25件关于盾构隧道的58例实测数据,给出了地表最大沉降量和地层条件的关系。徐方京[5]、刘招伟等[6]基于地铁施工实测值分析,提出了描述盾构推进中沉降计算的的经验式,包括地表影响范围、沉降与隆起预估法、纵向沉降、前方与侧方土体水平位移预估等。杨晓杰等[7]、李曙光等[8]以实际隧道工程为例,运用FLAC3D数值软件,对隧道开挖引起的地层沉降进行了数值模拟分析,并将分析结果与实测数据对比。杨福麟等[9]以武汉地铁某区间隧道施工为研究背景,采用有限元模拟软件MIDAS/GTS模拟隧道断面开挖的过程,分析了因隧道开挖所引起的地面沉降,并根据隧道施工过程中地面和临近建筑物的沉降情况,优化施工预处理方案。由此可见,目前对于盾构下穿建筑物的研究大多关注具体工程的建设引起的地面沉降问题,对于盾构穿越施工的扰动控制研究较少,并且考虑的建筑物类型有限。

基于上述研究成果, 本文以常州轨道交通 2 号线红梅公园站 - 五角场站区间为背景, 针对土压平衡盾构隧道下穿越重要建筑物施工, 分析了盾构下穿越建筑物施工微扰动变形控制指标, 并利用 MIDAS/GTS NX 进行数值模拟, 分析不同类型建筑物在隧道开挖过程中的沉降变化, 为类似工程施工参数设计提供参考。

## 2. 工程概况

常州轨道交通 2 号线红梅公园站 - 五角场站区间线路出红梅公园站后侧穿水门桥、在建月馨苑地下车库, 下穿京杭运河及驳岸后进入五角场站。沿线分布有水门派出所、常州市儿童医院、太平兴国石经幢(文物)、御和苑、东坡公园、2~3 层房屋等主要建筑物。区间隧道埋深 9.6~20.0 m, 最小曲线半径  $R = 320$  m, 线路中线间距 12~16 m, 最大纵坡坡度 25.1‰, 如图 1 所示。



Figure 1. Route of Hongmei park station-Wujiaochang station  
图 1. 红梅公园站 - 五角场站区间线路图

本工程采用中铁装备 CTE6440E-0660 复合式土压盾构机, 该盾构机的特点是可以向土仓及开挖面内加注各种添加剂, 改良土质, 保证盾构机安全、高速推进; 螺旋机设计有双闸门系统和应急闸门系统, 能够有效防止因下穿地层含水量大造成出渣喷涌现象; 拥有自动导向测量系统, 能够方便, 直观, 精准的控制盾构掘进姿态, 具有先进的功能特性。同时, 可针对本工程的地质条件情况以及覆土厚度, 选取主动保护措施进行施工。

## 3. 隧道施工微扰动变形控制标准

### 3.1. 隧道施工对建筑物的影响方式

施工不可避免地对周围土体产生扰动, 施工引起的地表沉降和变形对建筑物的影响程度, 除地层特征以外, 还与建筑物的基础与结构型式、建筑物与隧道的相对位置, 以及地表变形性质和大小有关。一般情况下, 隧道开挖对建筑物的影响有以下几种方式:

#### 1) 地表不均匀沉降

地表过量的不均匀沉降将导致房屋基础开裂, 相邻框架荷载增加, 引起多层或高层建筑的倾斜等危害。地基允许的不均匀沉降, 对于砌体承重结构由局部控制, 对于框架结构和单层排架结构由相邻柱基的沉降差控制, 对于多层建筑和高耸结构由倾斜值控制。

#### 2) 地表曲率

由于地表曲率变化造成对建筑物的损害程度较大,在负曲率(地表相对下凹)的作用下,建筑物的中央部位悬空,使墙体产生正“八”字裂缝和水平裂缝。如果建筑物长度过大,则在重力作用下,建筑物将会从底部断裂,使建筑物破坏;在正曲率(地表相对上凸)的作用下,建筑物的两端将会部分悬空,使建筑物产生倒“八”字裂缝,严重时会出现房架或梁的端部从墙体或柱内抽出,造成建筑物倒塌。

建筑物因地表弯曲而导致的损害是一种常见的隧道开挖损害形式,这种损害与地基本身的力学性质有关,更与开挖引起的地表变形有关。

### 3) 地表水平变形

地表水平变形有拉伸和压缩两种,它对建筑物的破坏作用很大,尤其是拉伸变形的影响,建筑物抵抗拉伸变形的能力远小于抵抗压缩变形的能力。由于建筑物对地表拉伸变形非常敏感,位于地表拉伸区的建筑物,其基础侧面、底面均受来自地基底外向摩擦力作用,基础侧面受来自地基底外向水平推力作用,建筑物抵抗拉伸作用的能力很小,不大的拉伸变形足以使建筑物开裂。地表压缩变形对于其上部建筑物作用的方式也是通过地基对基础侧面推力与底面摩擦力施加的,其力的方向与拉伸时相反。一般建筑物对压缩具有较大的抵抗能力,但若压缩变形过大,同样可以对建筑物造成损害。

可见如果隧道施工中要尽量减少对邻近建筑物的损坏,则要对地表不均匀沉降、地表曲率以及地表水平变形进行严格控制,但实际施工中控制这三种地表变形量主要通过控制地表沉降来进行。这就为我们提供了一种可以建立较为简单可行的控制标准,先得知建筑物的极限拉应变和容许倾斜率,再通过建筑物的极限拉应变和容许倾斜率反算地表沉降基准值,以地表沉降基准值为评价标准来确定建筑物是否受到损害。

## 3.2. 土体扰动控制指标

地下工程下穿越施工要从地下天然原状土中穿过,将不可避免地周围土体产生扰动,进而引起土体变形,导致地面建筑物倾斜、开裂乃至坍塌。在施工过程中,不同的施工工况,都不同程度地对土体产生扰动,土体受施工扰动的主要控制因素有:

### 1) 应力状态的改变

在下穿越工程的隧道或地下洞室掘进中,隧洞不同位置土体所受的应力不同,因而土体的应力状态即可作为衡量土体扰动的标准之一。

### 2) 含水量及孔隙比的变化

施工过程中的工程降水、以及可能遇到的暴雨等引起的地下水位升降,均使土体含水量发生变化,从而引起土体强度、承载力的变化。含水量的变化,可能会引起土体的压缩性变化,从而使地面产生差异沉降。实践表明,随着含水量的增加,土体的压缩性增加,不大的应力增量将产生可观的沉降,导致地面沉降增大,地表出现裂缝、危及相邻建(构)筑物的安全。

天然的土体大多具有结构性,在沉积过程中,土体内可能形成一些大的孔隙,施工过程能够对这些大孔隙产生明显的影响。而土体孔隙的改变直接影响着土的密实度、抗剪强度、承载力、固结状态及渗透性。

### 3) 土体结构性部分破坏

土结构性与土的形成过程有关,既与土的沉积环境、各种沉积力、土颗粒性质及土颗粒表面力、以及沉积后各种地质力的作用有关。土结构性是上述因素综合作用的最终产物。从广义上讲,其对土的力学特性有很大的影响。

对于灵敏度很高、结构性很强的土体,当受到外来因素的扰动时,土粒间的胶结物质以及土粒、离子、水分子所组成的平衡体系受到破坏,土的强度降低和压缩性增大,其内部结构和应力状态均会发生变化。扰动改变了土体的应力和应变状态,压缩指数随扰动度增加而减少,结构性软土压缩指数随扰动度增加而减少的幅度较大,结构屈服应力随扰动度增加而减小,二者之间基本呈线性关系。



#### 4) 化学成分分离与混合

在顶管施工中, 为了将盾构与土体之间的干摩擦变为湿润摩擦, 减小摩擦阻力, 常采用注浆处理。注浆还可以起支撑作用, 在注浆压力下使隧洞变得稳定; 同时可以改良土质, 通过泥浆向管道周围土体的渗透作用来改良不好的土质。注浆这种处理方法将改变土体原有的化学成分, 对地基土形成有利扰动。

### 4. 数值模拟方法与工况设计

#### 4.1. 数值计算模型尺寸与材料参数选取

根据地质勘察资料, 利用 MIDAS/GTS NX 软件进行数值模拟土体、盾构壳体、建筑物墙体。盾构机头采用壳单元模拟。模型长 160 m, 宽 140 m, 高 80 m、隧道轴线至地面 15 m, 至底部边界 65 m。两隧道轴线间距 14 m、最小曲线半径  $R = 320$  m、最大纵坡坡度 25.1‰。隧道开挖直径 5.5 m, 管片厚度 0.35 m、宽度 1.2 m, 如图 2、图 3 所示。

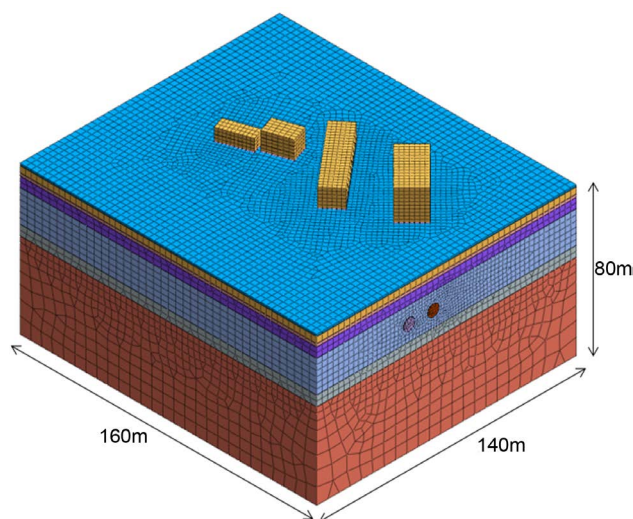


Figure 2. Model of shield crossing the building  
图 2. 盾构穿越建筑物计算模型

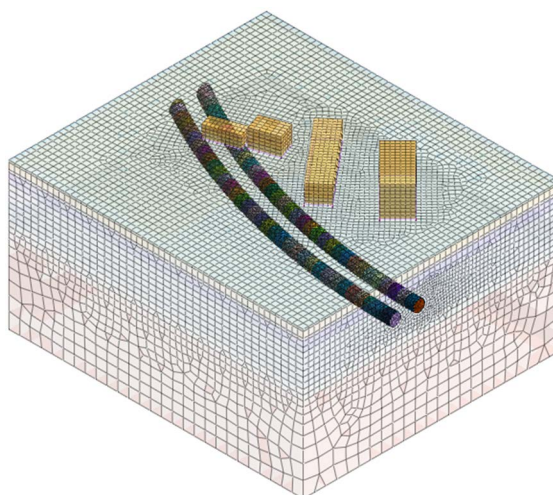


Figure 3. Relative position of stratum, tunnel and building  
图 3. 地层、隧道、房屋相对位置

区间隧道主要穿过的土层物理力学参数、材料参数根据地质勘察报告以及相关标准，可初步确定各参数如表 1、表 2 所示。此外，计算注浆压力 300 kPa，管片为 1.2 m/环。左线先行开挖，两线开挖相差 100 环(120 m)。

4.2. 计算工况

为了分析隧道开挖期间对地表不同类型建筑物的变形影响，本文模型分别计算隧道不同开挖步中的侧穿越、下穿越混二民房和混三民房引起的变形情况。

Table 1. Physical and mechanical parameters of stratum in the model

表 1. 计算模型地层物理力学参数

层号	土层名称	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模量(MPa)	厚度(m)	泊松比	C(kPa)	$\varphi(^{\circ})$
① <sub>1</sub>	杂填土	19.80	2.00	1.10	0.43	8.00	12.00
②	粉质黏土	19.20	5.24	3.40	0.39	23.13	11.93
③ <sub>2</sub>	黏土	20.00	6.66	1.50	0.28	50.20	14.70
⑤	黏质粉土夹粉砂	19.74	9.67	5.30	0.27	6.94	28.59
⑥	粉质黏土	20.21	7.40	17.20	0.32	54.89	16.43
⑧ <sub>2</sub>	粉砂	19.50	10.00	5.50	0.28	6.10	29.80
⑨ <sub>2</sub>	(粉质)黏土	20.00	6.26	46	0.33	41.80	14.80

Table 2. Physical and mechanical parameters of the material

表 2. 计算模型材料物理力学参数

材料	重度 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量(GPa)	厚度(m)	泊松比
盾壳	78.5	210	0.10	0.3
管片	25	30	0.35	0.2
浆液	18	0.4	3.0	0.3

5. 计算结果分析

5.1. 总体沉降分析

通过对建立的盾构隧道下穿建筑物的全模型进行数值模拟计算分析，得到对应的全模型位移云图、沉降云图和水平方向位移云图(图 4)。

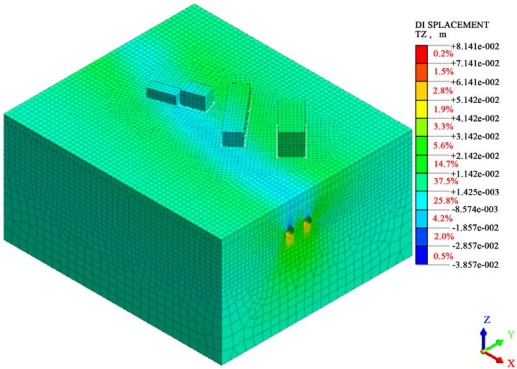


Figure 4. Vertical displacement of land surface/building  
图 4. 地表/房屋沉降竖向位移云图

如图 5 所示, 可以发现在隧道上方的地表发生沉降, 沉降最大约为 8.07 mm, 位于隧道两线中点上方。随着离隧道中线距离增加, 沉降减小, 而隆起增加。房屋最大隆起约 8.53 mm, 需要引起注意。

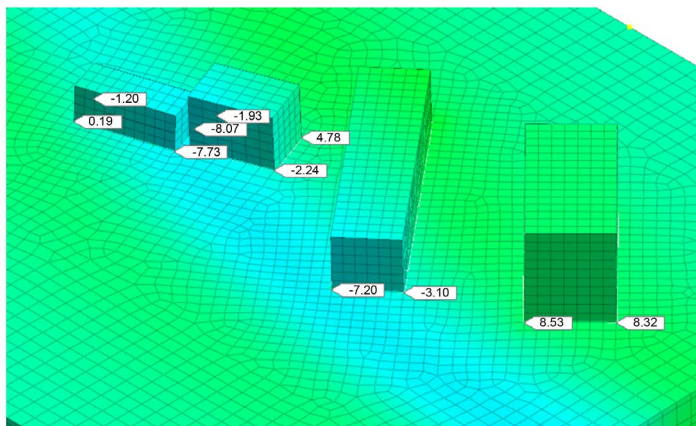


Figure 5. Numerical simulation results of land surface/building

图 5. 地表/房屋沉降数值模拟结果

图 6 为民房竖向位移图, 可以发现在隧道上方形成一道明显的下沉区(蓝色部分), 而周围形成隆起区(绿色部分)。选取典型房屋, 本次隧道下穿越民房, 其中三所民房为下穿越, 一所为侧穿越。

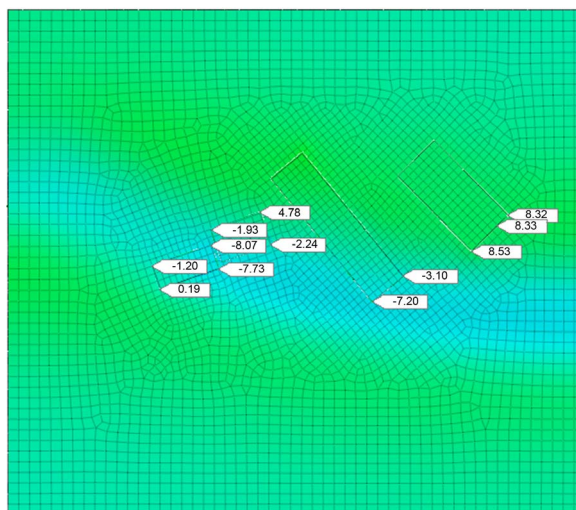


Figure 6. Planform of land surface/building

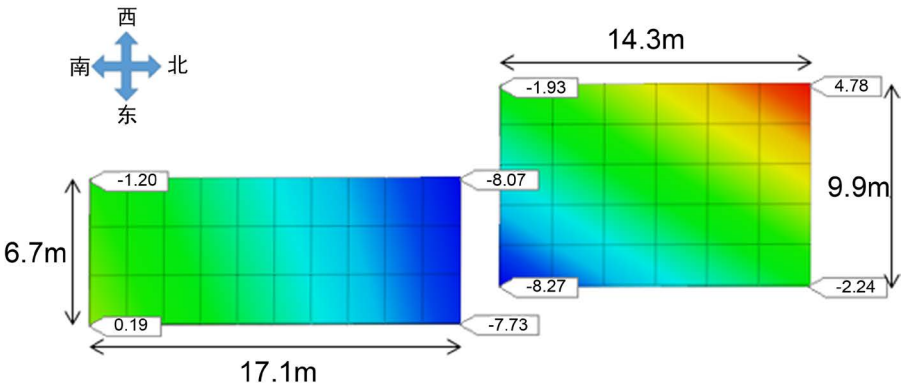
图 6. 地表/房屋沉降俯视图

## 5.2. 民房沉降分析

如图 7 所示, 混二民房(左)沉降最大为 8.07 mm, 位于房屋西北角; 最大隆起为 0.19 mm, 位于房屋东南角。均在控制标准之内。混三民房(右)沉降最大为 8.27mm, 位于房屋东南角; 最大隆起为 4.78 mm, 位于房屋西北角。沉降值在控制标准之内, 但隆起值略超过控制标准(控制标准为 4 mm)。

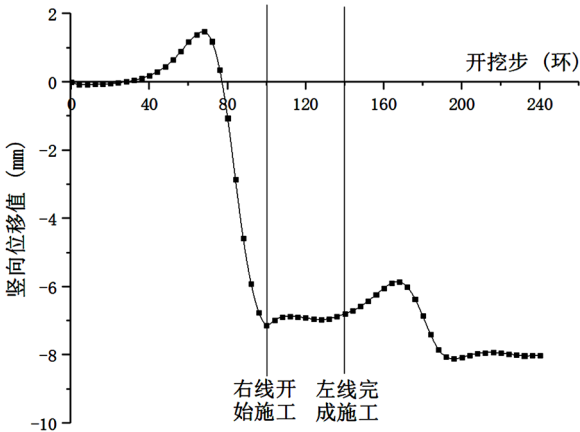
混二民房(左)东西向沉降差为 1.39 mm, 边长为 6.7 m, 故倾斜度为 0.21‰, 小于控制标准(2‰), 南北向沉降差为 7.92 mm, 边长为 17.1 m, 倾斜度为 0.46‰, 小于控制标准(2‰)。混三民房(右)东西向沉降差为 7.02 mm, 边长为 9.9 m, 故倾斜度为 0.71‰, 小于控制标准(2‰), 南北向沉降差为 6.71 mm, 边长

为 14.3 m，倾斜度为 0.47‰，小于控制标准(2‰)。可以看出混三民房最大沉降位于房屋东南角，故针对此点进行监测，观察整个施工过程该点沉降位移变化情况。



**Figure 7.** Vertical displacement of building (Left is two-story concrete house, Right is three-story concrete house)  
**图 7.** 民房竖向位移(左为混凝土二层民房，右为混凝土三层民房)

从图 8 中可以看出，在左线开始施工后，监测点位移几乎没有变化，在 40 开挖步，即左线开挖 48 m 时(一个开挖步为 1.2 m)，监测点开始发生隆起，此时监测点距离掌子面的水平直线距离约 48 m。此时隧道开挖开挖面距离监测点较远，监测点不因开挖而发生沉降，但因掌子面顶推力发生隆起。当开挖到第 68 个循环步时(左线开挖 81.6 m)，隆起达到最大值，约 1.47 mm，此时开挖面距离监测点水平距离约 14.4 m。从该开挖步开始，由于开挖面距离监测点较近，监测点开始发生沉降，在第 80 开挖步(左线开挖 96 m)时，监测点从隆起转变为下沉，且下沉速度较快，此时开挖面正好到达监测点正下方。在第 100 开挖步时(左线开挖 120 m)，沉降达到极大值，约 7.12 mm。此时左线开挖面已经过监测点水平距离约 24 m，且右线开始施工，距离监测点约 96 m。在之后的 40 个开挖步中，监测点竖向位移没有较大变化，稳定于 7 mm 左右。在第 140 个开挖步时(右线施工 48 m)，左线完成施工，右线距离监测点约 48 m，此时监测点又发生一定隆起，原因与前述左线施工 48 m 一样，为顶推力引起的微小隆起。在第 168 个开挖步时(右线开挖 81.6 m)，监测点停止第二次隆起，此时右线开挖面距离监测点约 14.4 m，与左线开挖时出现一样的情况。随后监测点开始继续下沉，直到第 196 个开挖步(右线开挖 115.2 m)时，沉降量不再增加，达到稳定，约 8.27 mm，此时右线开挖面已经过监测点约 19.2 m。



**Figure 8.** The curve of vertical displacement with excavation process  
**图 8.** 竖向位移随开挖过程的变化曲线



综上所述,无论是左线还是右线施工,在开始的 40 个开挖步(开挖 48 m),由于距离监测点较远,对监测点没有影响。在随后的 40 个开挖步(继续开挖 48 m),距离监测点 48 m 左右,监测点开始受到影响。由于顶推力作用,导致土体(房屋)所受隆起占主导,地表(房屋)略有隆起,但是第二次(右线开挖)隆起值明显小于第一次,仅约 0.94 mm,为第一次(1.47 mm)的 64%。在之后的 40 个开挖步(继续开挖 48 m),开挖面不断靠近监测点,监测点开始下沉,当经过监测点正下方时,下城速度最快。当开挖面经过监测点约 24 m 时,监测点竖向位移才达到稳定,不再下沉。第二次下沉(右线开挖)虽然与第一次规律一样,但下沉量大大减小,第二次开挖引起的下沉量约 2.25 m,仅为第一次(7.12 mm)的 32%。

监测点经历了 7 个变形阶段:无变化(距离较远)→第一次隆起(距离左线开挖面 48~14.4 m)→第一次沉降(距离左线开挖面 14.4~24 m)→第一次稳定阶段(左线开挖面已超过 24 m,距离右线开挖面大于 48 m)→第二次隆起(距离右线开挖面 48~14.4 m)→第一次沉降(距离左线开挖面 14.4~19.2 m)→最终稳定阶段(右线开挖面已超过 19.2 m)。

断面地表最终沉降如图 9 所示,其中水平距离=0 m 为隧道两线中轴面,负值表示左侧,正值表示右侧。可以发现隧道开挖引起的沉降集中在中轴线左侧 21 m 至右侧 18 m 范围内。在左右侧各 30 m 左右,隆起值最大。在中轴面偏左,沉降值达到最大,约 11 mm。左侧 53 以外,位移几乎为 0,右侧 73 m 以外,位移几乎为 0。沉降曲线近似对称,但右侧的变形和影响范围明显大于左侧,其原因如下:第一,右侧为后挖,相当于收到两侧扰动,故变形较大。第二,小半径盾构隧道开挖,盾构开挖曲线的圆心位于右侧(隧道开挖向右侧偏移),故右侧收到的影响更大。

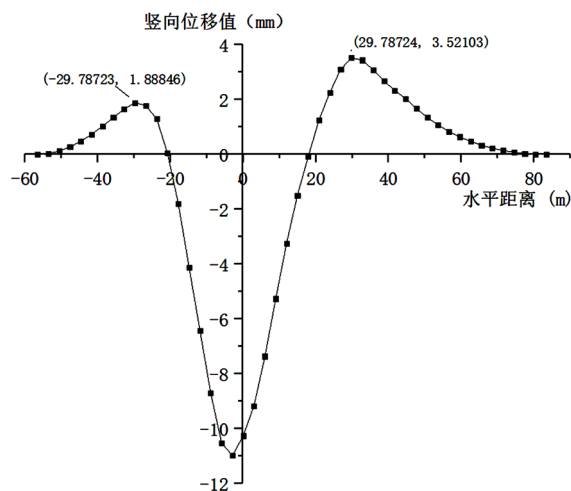


Figure 9. Final surface settlement of section X = 0

图 9. X = 0 断面地表最终沉降值

## 6. 结论

本文主要分析了隧道施工对建筑物的影响方式和扰动控制指标,并利用 MIDAS/GTS NX 有限元软件建立了常州轨道交通 2 号线下穿建筑物的二维数值模型,对隧道开挖过程中下穿越、侧穿越混二民房和混三民房引起的地表沉降进行了分析,得出了以下结论:

1) 隧道施工对建筑物的影响方式主要包括地表不均匀沉降、地表曲率变化和地表水平变形三类。在实际隧道施工中,可以通过控制地表沉降来控制这三类地表变形量。

2) 在隧道施工过程中,土体受施工扰动的主要控制因素包括应力状态的改变、含水量及孔隙比的变化、土体结构性部分破坏和化学成分分离与混合四类。

3) 本工程隧道下穿越建筑物时, 随着离隧道中线距离增加, 沉降减小, 而隆起逐渐增加。

4) 在顶推力作用下, 左线开挖中土体(房屋)所受隆起占主导, 右线开挖的隆起值明显小于左线。在整个开挖过程中, 地表呈现隆起 - 沉降 - 稳定的三阶段变化。

## 基金项目

“土压平衡盾构长距离下穿京杭运河施工控制原理及控制关键技术研究”项目。

## 参考文献

- [1] 刘承磊. 地铁盾构隧道穿越现有建筑物地面变形控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- [2] 刘毅. 地铁隧道开挖对建筑结构沉降控制标准研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [3] Peck, R.B. (1969) Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground. *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico City, 225-290.
- [4] 尹旅超, 朱振宏, 李玉珍. 日本隧道盾构新技术[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1999.
- [5] 徐方京. 软土隧道与深开挖引起孔隙水压力与地层移动分析[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 1991.
- [6] 刘招伟, 王梦恕, 董新平. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(8): 1297-1301.
- [7] 杨晓杰, 楮立孔, 张蓓. 城市隧道施工引起地表沉降数值模拟研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2005(3): 98-100.
- [8] 李曙光, 方理刚, 赵丹. 盾构法地铁隧道施工引起的地表变形分析[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(5): 87-92.
- [9] 杨福麟, 刘永林, 胡斌. 武汉地铁隧道开挖引起地表沉降的数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 85-91.