

# Analysis of Construction Mechanics Characteristics of Existing Shield Tunnels in Wuzhou Metro Line 1

Ren Tang

Xinjiang Wujing Infrastructure Construction Management Co. Ltd., Urumqi Xinjiang  
Email: 1562631590@qq.com

Received: Nov. 13<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 9<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 16<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The tunneling construction of shielded tunnels adjacent to existing buildings has many uncertainties and difficult deformation control. In order to analyze the construction mechanical properties of the shield adjacent to existing buildings, a three-dimensional model of shield tunnel, stratum and adjacent existing buildings was established. The large-scale geotechnical software FLAC3D was used to simulate the whole process of the adjacent construction. The numerical analysis results show that after the completion of the left and right lines of the shield, the maximum settlement of the ground is about 4.51 mm, and the influence of the ground subsidence is within 24.5 m of the center line of the tunnel. The settlement of the soil around the lining structure is about 15.5 - 16.6 mm. In order to control the soil loss of the surrounding rock of the tunnel, it is necessary to strengthen the construction measures such as shield tail grouting and secondary grouting. The research results can provide a reference for the construction of shielded adjacent buildings in the similar geological environment of Urumqi.

## Keywords

Subway Tunnel, Construction Control, Shield, Numerical Simulation

---

# 乌市地铁1号线盾构隧道近接既有建筑的施工力学特性分析

唐人

新疆乌京基础设施建设管理有限公司, 新疆 乌鲁木齐  
Email: 1562631590@qq.com

收稿日期: 2019年11月13日; 录用日期: 2019年12月9日; 发布日期: 2019年12月16日

## 摘要

盾构隧道近接既有房屋建筑的掘进施工具有不确定因素多和变形控制难等特点。本文采用有限差分软件FLAC3D建立三维地质模型,重点分析盾构隧道、地层、开挖工况下各自的施工力学行为,结果表明:盾构开挖完成后,盾构隧道中心线处地面沉降最大值为4.51 mm,盾构隧道中心线左右24.4 m为地表沉降影响范围;衬砌结构周围土体沉降约为15.5~16.6 mm,为控制隧道围岩土体损失,需加强盾尾注浆及二次注浆等施工措施。研究成果可为乌市相似地质环境的盾构近接建筑物的施工提供一定参考。

## 关键词

地铁隧道, 施工控制, 盾构, 数值模拟

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

随着各大城市地下空间的开发,城市轨道交通网络也在逐渐完善中,因此,城市地铁隧道穿越既有建筑物的情况日益普遍,准确预测盾构开挖过程中地表及建筑物的变形,对于优化掘进参数具有重要意义[1][2]。目前,国内外学者在盾构下穿既有建筑物的研究方面取得了丰硕的成果。Mroueh [3]等建立三维地质模型,对盾构轴线以不同角度穿越既有建筑物的情况,分析了盾构开挖对建筑基础和地面沉降的影响。姜忻良[4]等建立框架-盾构模型,研究了盾构隧道下穿建筑物时对框架结构内力和沉降的影响,研究表明,建筑物基础的沉降主要发生在盾构隧道穿越建筑物的区间内。杨广武[5]等通过数值模拟方式,研究了盾构施工力学行为对已有隧道及地层的影响。

上述研究成果主要集中在粘土地层中盾构隧道穿越既有建筑情况。而针对砂卵石地层,尤其是乌鲁木齐无水砂卵石地层,这方面的数值分析研究鲜见报道。乌鲁木齐无水砂卵石地层颗粒间几乎无粘聚力,在开挖影响下该地层容易松动垮塌,进而引起过大的地面沉降,过大沉降将会危及隧道附近建筑的结构安全[6]。盾构隧道下穿建于上世纪90年代的砖混结构,基础多为独立基础,整体性差,刚度小,对不均匀沉降的耐受能力极差。因此,当盾构隧道周围存在大量的老建筑时,为了保证隧道顺利施工以及附近建筑的安全,非常有必要对盾构隧道开挖引起近接建筑物的施工力学特性展开精细化研究[7]。

本文结合乌鲁木齐地铁1号线16标段盾构隧道在无水砂卵石地层中近接穿越某质量监控中心大楼的施工情况,采用数值模拟方法,考虑建筑变形与隧道变形的相互耦合作用,按照结构-土体-隧道共同作用的原则建立模型,对盾构隧道掘进过程中近接建筑物的施工力学特性展开研究。

## 2. 工程概况

乌市轨道交通1号线采用盾构法施工,盾构隧道内径5.5 m,外径6.2 m。由于线路走向原因,地铁1号线16标段下穿一某质量监控中心大楼(见图1)。该楼建于上世纪90年代,为整体4层,局部2~3层的砖混建筑,采用独立基础,基础埋深为1.8 m。1号线盾构左线隧道与该建筑物在水平方向的净距仅为4.91 m,隧道顶部与该建筑物基础底面竖向垂直净距约8.75 m(见图2),位于隧道开挖的影响范围内。尽管在施工前期对近接建筑物附件地层进行相应的注浆加固,但是由于无水砂卵石地层的复杂性以及建筑

物与隧道水平距离太近，仍然存在大量不确定因素，有必要开展盾构近接既有建筑物的施工力学特性研究，为具体施工提供技术指导。

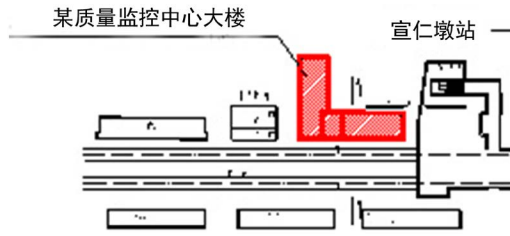


Figure 1. Building plan  
图 1. 建筑平面图

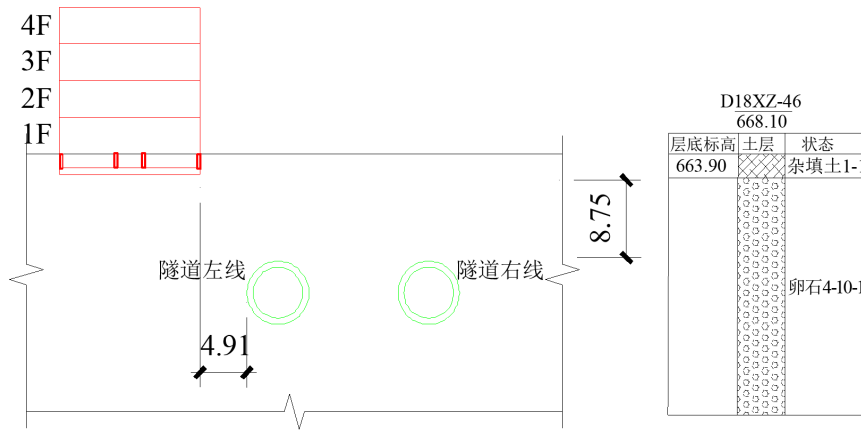


Figure 2. Location relationship between a quality monitoring center building and the subway  
图 2. 某质量监控中心大楼与地铁的位置关系

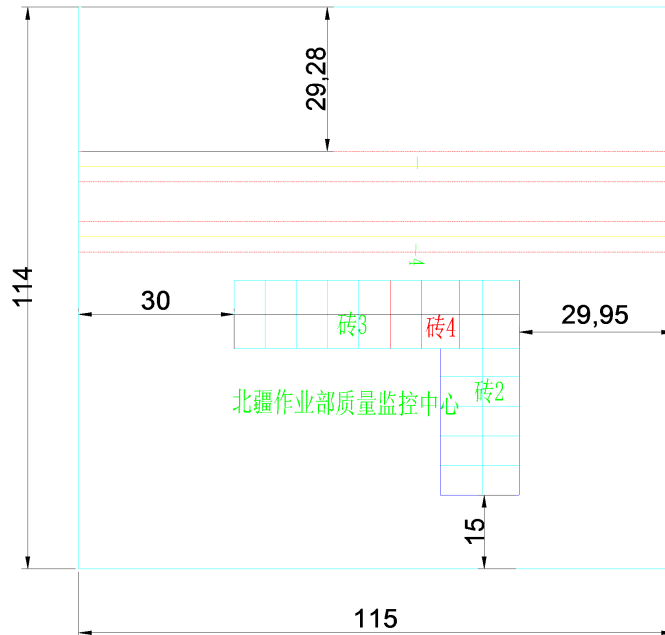


Figure 3. Model plane dimensions  
图 3. 模型平面尺寸

### 3. 地层结构

根据勘察资料显示, 场地内主要地层为① 1-1 杂填土(Q<sup>4</sup> ml), ② 4-9-1 中密圆砾, ③ 4-10-2 密实卵石。场地地下水位较深, 在勘察期间未见地下水。

### 4. 三维模型及计算参数

#### 4.1. 模型建立

本次盾构隧道外径为 6.2 m, 内径 5.5 m, 在靠近大地窝堡站的某质量监控中心大楼处的隧道埋深约 8.75 m, 左隧道边界距离大楼基础的水平距离仅 4.91 m。建立模型过程中, 为消除边界效应影响, 取上下、左右边界为开挖外径的 4 倍。因此, 某质量监控中心的计算模型几何尺寸为: 沿隧道轴线的模型长为 115 m, 垂直隧道轴线的模型宽为 114 m, 整个模型计算厚度为 50 m, 见图 3。

为了建立符合计算要求的模型, 采用 ANSYS 建立地层、下穿建筑物和盾构隧道的模型, 同时选用 SOLID45 为网格划分单元, 对整个模型进行网格划分, 模型共划分为 223,581 个单元, 共 66,073 个节点, 如图 4 和图 5 所示。

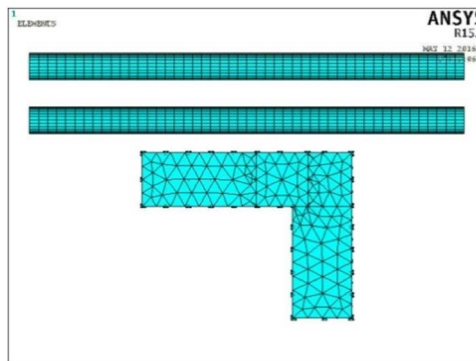


Figure 4. Tunnel and proximity building model  
图 4. 隧道与近接建筑模型

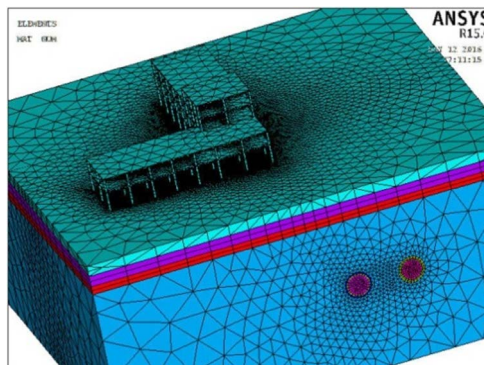


Figure 5. Model meshing tunnel  
图 5. 模型网格划分隧道

#### 4.2. 计算参数及边界条件

根据乌市轨道交通大地窝堡 - 国际机场提供岩土物理指标建议值, 结合数值计算经验, 本次计算的参数如表 1 所示。

**Table 1.** Numerical calculation parameters**表 1.** 数值计算参数

地层	容重/kN/m <sup>3</sup>	粘聚力/kN/m <sup>2</sup>	内摩擦角/°	弹性模量/kN/m <sup>2</sup>	泊松比
杂填土	18.9	2	18	21,000	0.32
中密圆砾	22.2	2	34	68,000	0.23
密实卵石	23.3	7.5	40	76,000	0.22
衬砌结构	25.2	1.25e3	43	30,000,000	0.21
同步注浆体	22.2	101	32	155,000	0.22

边界条件的设置需要考虑到模型的边界与实际情况一致。本次数值模拟固定底面的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向，固定模型四周法向方向，顶面为自由边界。

### 4.3. 计算的本构模型和屈服准则

低应力作用下岩土体的本构关系基本符合理想弹塑性体模型，满足 Morh-Coulomb 屈服准则因此，在数值计算过程中，本次岩土体和衬砌结构及同步注浆材料均选用 Morh-Coulomb 屈服准则。

## 5. 盾构隧道近接某质量监控中心大楼的施工力学特性

### 5.1. 计算工况

根据施工组织计划，盾构右线隧道领先左线 240 m，但由于模型长度为 115 m，因此，在本次数值模拟中，先施工右线，等右线完成以后在施工左线。左右线在施工的工程中，每次掘进 1.2 m，接着拼装管片并壁后注浆。为了更加真实的模拟施工全过程，将左右线施工一共分 7 个计算工况：

- ① 右线隧道开挖面距离某质量监中心大楼 10 m；
- ② 右线隧道开挖面距离某质量监中心大楼 5 m；
- ③ 右线隧道穿越某质量监中心大楼的中心；
- ④ 右线隧道穿越某质量监中心大楼；
- ⑤ 右线隧道已完全穿越模型且左线开挖至距离某质量监中心大楼 10 m；
- ⑥ 右线隧道已完全穿越模型且左线开挖至距离某质量监中心大楼 5 m；
- ⑦ 左线隧道已完全穿越某质量监中心大楼。

### 5.2. 开挖及衬砌结构模拟

#### ① 盾构掘进的数值实现

将盾构连续掘进的过程简化为一个非连续的掘进过程，用改变单元属性的方式来模拟盾构推进。在 FLAC3D 中采用空单元 null 模型开挖掘进的岩土体，空区域内应力为零，并且没有重力。为了充分模拟土压平衡盾构机掌子面的作用效果，本次数值分析中每个掘进步开挖 1.2 m，同时在掌子面上施加实际梯形土压力，其中梯形顶部土压力为 0.04 MPa，梯形底部土压力为 0.09 MPa。

#### ② 衬砌结构的模拟

盾构隧道衬砌结构采用六面体实体单元建模。考虑到壁后同步注浆的影响范围，将其简化为一个与盾构衬砌结构同心的圆。衬砌结构和同步注浆范围如图 6 所示。

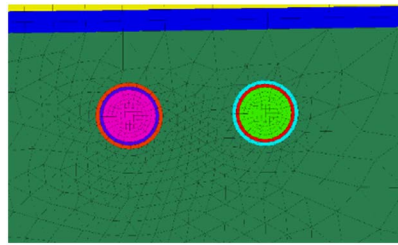


Figure 6. Lining structure and simultaneous grouting calculation model  
图 6. 衬砌结构和同步注浆计算模型

### 5.3. 盾构隧道近接某质量监控中心大楼的施工计算结果

在 FLAC3D 中依次对以上 7 个工况进行模拟，得到盾构隧道近接某质量监控中心大楼的施工力学特性如表 2 所示。

Table 2. Construction mechanical properties of shield tunnels in each condition  
表 2. 每种工况中盾构隧道的施工力学特性

工况	衬砌周围土体最大沉降/mm	盾构衬砌最大主应力/MPa	盾构衬砌最小主应力/MPa	地表沉降值/mm	沉降影响范围/m
①	15.5	-0.41	-3.8	2.37	19.5
②	15.7	-0.41	-3.8	2.73	19.6
③	16.2	-0.41	-3.7	3.02	20.5
④	16.2	-0.41	-3.8	3.12	20.8
⑤	16.2	-0.41	-3.8	3.87	21.0
⑥	16.2	-0.41	-3.8	4.05	21.0
⑦	16.6	-0.41	-3.7	4.51	24.5

从工况①~⑦的结果可以看出，随着盾构隧道的掘进，衬砌结构周围土体、衬砌结构应力和路面沉降范围都在逐渐变大。限于篇幅，本文仅提取最后一个工况，即工况⑦的数值分析结果，详细阐述盾构隧道近接既有建筑的施工力学特性。

#### ①地面沉降

图 7 为盾构右线隧道、左线完全穿越某质量监控中心大楼时，隧道开挖影响范围内地面沉降等值线图，从云图可以看出，地面沉降为漏斗形沉降，沉降范围 24.4 m，最大沉降值为 4.51 mm，随着每个开挖工况的进行，隧道中心线地面处最大沉降为 4.12 mm，由于地层结构和地面加固原因，沉降最大的地方并非在隧道中心线地面处如图 8 所示。

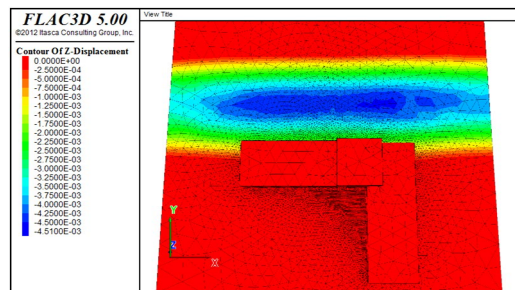
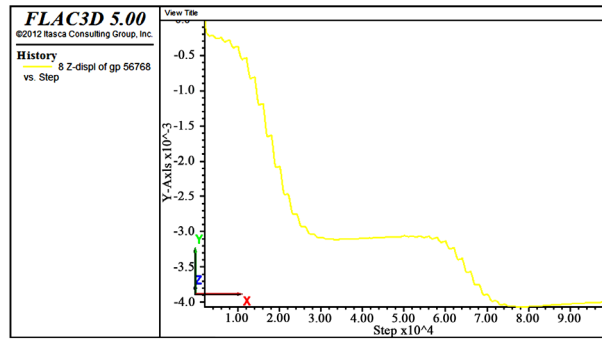


Figure 7. Contour map of the ground subsidence when the right line and the left line are completely close to the flight building/m  
图 7. 右线、左线完全近接穿越航大楼时地面沉降等值线图/m

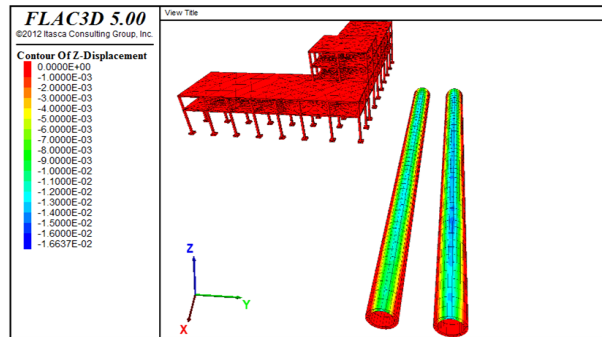




**Figure 8.** The right and left lines are completely close to the tunnel center ground monitoring point when crossing the flight building/m

**图 8.** 右线、左线完全近接穿越航大楼时隧道中心地面监测点/m

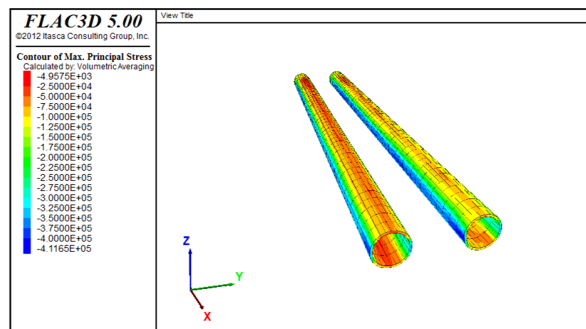
图 9 为盾构右线隧道、左线近接完全穿越某质量监控中心大楼时，隧道衬砌结构周围土体的沉降变形。由于在盾构掘进过程中，存在 1 cm 的盾尾间隙，盾构周围土体发生地层损失，导致衬砌结构周围土体沉降较大，最大约为 16.6 mm，与实际监测变形 15.1 mm 较为接近。盾尾间隙是盾构掘进过程中不可避免的施工间隙，为了降低衬砌结构的变形，应加强盾尾间隙注浆量，并保证注浆压力。



**Figure 9.** Contour map of lining settlement when the left and right lines pass through the building/m

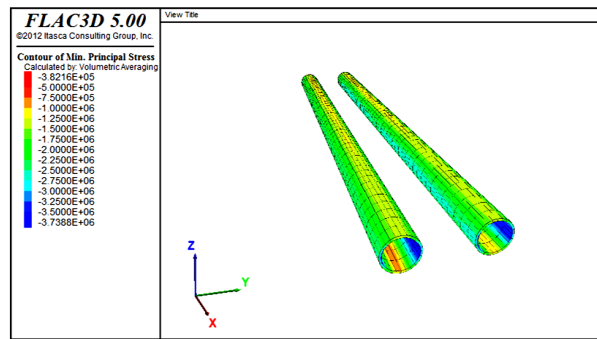
**图 9.** 左右线近接穿越大楼时衬砌沉降等值线图/m

图 10 和图 11 分别为盾构右线、左线质量监控中心时衬砌结构的最大主应力和最小主应力等值线图，云图显示，两侧衬砌结构最大主应力最大值为-0.41 MPa；拱底最小主应力为-3.9 MPa，但均小于衬砌结构的抗压强度。因此，可以看出，盾构掘进过程中衬砌结构抗压强度满足要求。但应该加强衬砌结构纵向和环向螺栓的连接。



**Figure 10.** The maximum principal stress of the shield lining when the left and right lines pass through the building/Pa

**图 10.** 左右线近接穿越大楼时盾构衬砌的最大主应力/Pa



**Figure 11.** Maximum small principal stress of shield lining when the left and right lines pass through the building/Pa  
**图 11.** 左右线近接穿越大楼时盾构衬砌的最大小主应力/Pa

## 6. 结论和建议

根据实际情况，建立无水砂卵石地层 - 结构 - 隧道三维地质模型，对地铁 1 号线近接某质量监控中心大楼的隧道掘进过程中的力学特性进行分析，得出结论如下：

① 盾构隧道在穿越质量监控中心大楼的过程中，随着开挖断面越来越靠近大楼基础，其地面沉降、基础位移以及沉降结构应力逐渐变大。

② 盾构开挖完成后，沉降区域为漏斗型，影响范围为中心线左右 24.4 m，最大沉降为 4.51 mm，但沉降最大地方并非在盾构轴线地面处。

③ 1 号线土压平衡盾构机的盾尾与周围土体存在 1 cm 的盾尾间隙，土体开挖后，壁后土体沉降较大，最大沉降约为 15.5~16.6 mm，为控制围岩沉降和地面沉降值，应加强盾尾注浆及地面注浆。

④ 衬砌结构的最大主应力约为 -0.41 MPa，最小主应力约为 -3.7~-3.8 MPa (表示压力)，随着开挖工况的进行，其值变化不大，总体受力满足衬砌结构的强度要求。

⑤ 为确保盾构穿越民建房屋时的安全，需在盾构推进过程中，加强监控频率，优化掘进参数，保证后注浆质量，以此来控制地面沉降。

## 参考文献

- [1] 张社荣, 冯晓成, 于茂, 王超. 盾构双线隧道下穿通信铁塔近接影响分析[J]. 铁道标准, 2016, 60(6): 100-105.
- [2] 张浩, 沈圣, 尚艳亮, 等. 盾构下穿既有建筑物沉降缝二维变形监测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(6): 1146-1155.
- [3] Mroueh, H., et al. (2003) A Full 3-D Finite Element Analysis of Tunneling-Adjacent Structures Interaction. *Computers and Geotechnics*, **30**, 245-253. [https://doi.org/10.1016/S0266-352X\(02\)00047-2](https://doi.org/10.1016/S0266-352X(02)00047-2)
- [4] 姜析良, 贾勇, 赵保健. 地铁隧道施工对邻近建筑物影响的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3047-3052.
- [5] 杨广武, 关龙, 刘军, 等. 盾构法隧道下穿既有结构三维数值模拟分析[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 54-60.
- [6] 魏龙刚. 盾构下穿大量老龄浅基民居沉降控制技术[J]. 铁道建筑技术, 2014(S1): 197-220.
- [7] 张团结, 汪远平. 盾构下穿城市房屋施工风险与对策研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 211-215+220.