

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.2225

# 地铁盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载影响研究

姚爱军, 张剑涛, 郭海峰, 郭彦非

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘 要:** 为提升地铁盾构隧道的防灾减灾能力, 以北京某典型地铁盾构隧道及邻域的基坑工程为基础, 应用相似材料模型试验与数值模拟相结合的方法, 研究了上方基坑开挖卸荷-加载作用下地铁盾构隧道的变形特征及围土压力分布规律, 并对基坑底部与盾构隧道顶部净距和基坑加载强度的影响进行了分析。研究表明: 盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载过程中, 随着基坑开挖卸荷的进行, 盾构隧道逐步上浮, 基坑开挖至底部时, 竖向位移达到最大值; 随着基坑加载的进行, 竖向位移可得到适量恢复, 最大竖向位移差及最大水平位移差均出现在基坑开挖卸荷完成阶段, 此时应尽早完成基础底板封闭施工。基坑开挖卸荷-加载过程中, 盾构隧道围土压力始终呈葫芦型对称分布, 盾构隧道顶部及底部土压力较大, 腰部土压力较小, 基坑开挖卸荷完成后, 长轴方向土压力明显减小, 基坑加载完成后, 土压力有所恢复, 但并未达到最初状态。随着基坑底部与盾构隧道顶部净距的增加, 盾构隧道结构位移、拱顶与拱底竖向位移差及水平收敛均逐步减小, 当净距大于  $3h$  ( $h$  为基坑深度) 时, 上方基坑卸荷-加载对盾构隧道影响逐步趋于轻微。在基坑加载强度为卸载强度的 2 倍时, 盾构隧道竖向位移可恢复至最初状态。

**关 键 词:** 盾构隧道; 土体卸荷; 基坑加载; 相似材料模型试验; 土压力

中图分类号: TU 473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 07-2318-10

## Influence of unloading-loading of foundation on shield tunnel underneath

YAO Ai-jun, ZHANG Jian-tao, GUO Hai-feng, GUO Yan-fei

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To improve the disaster prevention and mitigation of metro shield tunnel, model test of similar material and numerical calculation is studied in this paper to simulate the construction of building adjacent to foundation pit in Beijing. Under unloading-loading conditions of the foundation pit above, the mechanical characteristics of shield tunnel are studied, and the influence of spacing between the bottom of the foundation pit and the shield tunnel top and the loading strength of foundation pit are also analyzed. As shown by calculation, in unloading stage, the vertical displacement of shield tunnel gradually increases. When the foundation pit is excavated to the bottom, the vertical displacement reaches the maximum value. Under loading condition, the vertical displacement of shield tunnel can be restored. The greatest impact on shield tunnel always occurs at the end of the foundation excavation. At this point, the work of foundation slab construction should be completed as soon as possible. In the unloading-loading process of foundation pit, earth pressure of shield tunnel presents calabash type symmetrical distribution. At the top and bottom of the shield tunnel the earth pressure is larger than the soil pressure in the middle of the shield tunnel. In unloading stage, the earth pressure of shield tunnel vertical axis was significantly reduced. In loading stage, the earth pressure of shield tunnel can be restored. With the spacing between the bottom of foundation pit and shield tunnel top increases, the displacement of shield tunnel, the displacement difference between arch bottom and arch and the horizontal convergence are incrementally reduced. When the spacing greater than 3 times of the depth of deep excavation, the additional deformation of shield tunnel caused by foundation pit unloading-loading effect is slightly. When the loading strength of foundation pit 2 times than the unloading strength, the vertical displacement of shield tunnel can be restored to its original state.

**Keywords:** shield tunnel; soil unloading; the foundation loading; model test of similar material; earth pressure

收稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51578023)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51578023).

第一作者简介: 姚爱军, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与科研工作。E-mail: yaj@bjut.edu.cn

## 1 引言

城市轨道交通建设对促进周边经济发展发挥了重要作用。大量的建(构)筑物邻近地铁隧道建设, 基坑开挖及随后建筑物的施做形成了一系列复杂的卸荷-加载作用模式, 对地铁盾构隧道造成了重要影响。国内外不少学者对此问题进行了研究分析, 张玉成<sup>[1]</sup>、左殿军<sup>[2]</sup>、刘国彬<sup>[3]</sup>、张伏光<sup>[4]</sup>等应用数值模拟方法对基坑卸荷作用下, 地铁盾构隧道的变形响应规律进行了分析研究; 贾夫子<sup>[5]</sup>、陈郁<sup>[6]</sup>等应用理论解析的方法, 对基坑卸荷作用下, 地铁隧道的变形进行了计算; 范垚垚<sup>[7]</sup>、徐长节<sup>[8]</sup>、李国龙<sup>[9]</sup>等对基坑卸荷-加载全过程中, 地铁隧道的变形响应进行了分析研究; 国外不少学者应用模型试验方法, 对隧道的变形特征、围土压力监测方法等进行研究, 例如 Kusui<sup>[10]</sup>、Leung<sup>[11]</sup>等。

现有研究成果侧重分析基坑卸荷-加载作用下的变形机制, 尤其是对基坑卸荷作用下的变形机制研究较为深入, 为建筑物施工全过程中地铁隧道的保护提供了大量的有益经验。但现有研究成果对基坑卸荷-加载作用下地铁隧道的围土压力分布规律及基坑加载作用下的变形特征研究较少。

基于此, 本文以北京某典型地铁盾构隧道及邻域的基坑工程为基础, 应用相似材料模型试验与数值模拟相结合的方法, 对上方基坑开挖卸荷-加载作用下的地铁盾构隧道的变形特征及围土压力分布规律进行了研究, 并分析了基坑底部与盾构隧道顶部净距  $l$  的影响和基坑加载强度的影响。

## 2 相似材料模型试验

### 2.1 试验原型

本文以北京某近地铁建设项目为工程背景, 根据其工程地质特征、岩土参数、基坑支护方式等进行相似材料模型试验。工点范围内某地铁盾构隧道为该工程重要风险源。盾构隧道内径为 5.4 m, 外径为 6.0 m, 衬砌管片采用 300 mm 厚的 C50 预制混凝土管片, 环宽为 1.2 m。

基坑采用放坡+地下连续墙+预应力锚索的联合支护方式。建筑红线范围较小, 以 1.0:0.2 放坡, 坡顶设为 0.8 m 宽混凝土护顶。地下连续墙墙厚为 0.8 m, 每幅宽度为 6.0 m, 混凝土强度等级为 C25, 采用圆形锁扣管接头。地下连续墙支护区域设置两道预应力锚索, 锚索孔径为 150 mm, 注浆材料为 PS0 42.5 素水泥浆, 水泥结石体强度等级 M25; 主筋采用 1 860 级 (7Φ5) 低松弛钢绞线。第 1 道锚

索位于地下连续墙顶部, 锚索入射角度为 10°, 水平间距为 1.50 m, 锚杆总长为 21.0 m, 其中锚固段长度为 15.0 m; 第 2 道锚索位于 -5.5 m 处, 锚索入射角度为 10°, 水平间距为 1.50 m, 锚杆总长为 23.0 m, 其中锚固段长度为 18.0 m。

### 2.2 相似系数确定

依据相似三定理<sup>[12-13]</sup> (相似正定理、 $\pi$ 定理和相似逆定理), 确定相似系数时主要考虑以下影响因素:

(1) 基坑及盾构隧道工程原型实际尺寸及试验模型箱工作条件;

(2) 保证盾构隧道及基坑邻域范围内土体, 在基坑开挖卸荷-加载作用下, 能为盾构隧道提供足够的作用力, 保证盾构隧道可以充分发生形变;

(3) 满足盾构隧道模型位移及围土压力的量测精度要求。

综合考虑以上因素, 模型试验几何、围土压力、黏聚力相似系数确定为 15:1, 内摩擦角、重力、泊松比相似系数为 1:1。

### 2.3 模型箱及基坑支护方案

试验装置采用大型地下工程试验模型箱, 模型箱尺寸为: 3 000 mm×1 000 mm×2 000 mm (长×宽×高)。模型箱由钢框架和有机玻璃组成, 如图 1 所示。



图1 试验模型箱  
Fig.1 Model test box

相似材料模型试验基坑支护方案与工程原型相同, 采用放坡+地下连续墙+预应力锚索联合支护方案。盾构隧道及地下连续墙均采用有机玻璃 (PMMA) 模拟, 弹性模量及几何相似比均为 15:1, 有机玻璃弹性模量为 2.5 GPa (原型弹性模量为 34.5 GPa)。盾构隧道模型壁厚为 20 mm、外径为 400 mm、内径为 360 mm, 长度为 980 mm; 地下连续墙模型厚度为 50 mm、高度为 1 000 mm、长度为 980 mm。盾构隧道及地下连续墙均在基坑施工前预



表 3 模型试验工况

Table 3 Working conditions in model test

工况编号	模型试验工况
工况 1	初始状态采样 (地下连续墙, 盾构隧道预埋完成)
工况 2	土方开挖至-133 mm
工况 3	放坡施工、第 1 道锚索张拉
工况 4	土方开挖至-266 mm
工况 5	土方开挖至-400 mm
工况 6	第 2 道锚索张拉
工况 7	土方开挖至-533 mm
工况 8	土方开挖至-600 mm
工况 9	基坑开挖卸荷完成, 静置至稳定
工况 10	铺设预制基础底板
工况 11	施加铸铁砝码 1.6 kPa
工况 12	施加铸铁砝码共计 3.2 Pa
工况 13	施加铸铁砝码共计 4.8 kPa
工况 14	施加铸铁砝码共计 6.4 kPa
工况 15	施加铸铁砝码共计 8.0 kPa
工况 16	施加铸铁砝码共计 9.6 kPa
工况 17	基坑加载完成, 静置至稳定

## 2.6 试验结果与分析

### 2.6.1 盾构隧道位移分析

相似材料模型试验中通过布置拉线式位移计量测盾构隧道监测点 9 竖向位移和监测点 13 水平位移, 将相似材料模型试验结果恢复至原型, 结果如图 4 所示, 图中竖向位移正值表示上浮。随着基坑开挖深度的不断增加, 盾构隧道竖向位移逐步发生上浮, 在开挖至基坑底部并静置到稳定阶段, 上浮量达到最大值, 约为 11.55 mm; 随着基坑加载的进行, 盾构隧道竖向位移逐步发生下沉, 在加载完成并静置到稳定阶段, 总位移量约为 6.45 mm, 整个过程中水平位移基本不变。模型试验中卸荷量总计 186.6 kPa, 加载量总计 144 kPa, 卸荷量大于加载量, 竖向位移最终恢复至原状态的一半, 若荷载继续增加, 则可能恢复到最初状态, 并持续增加。

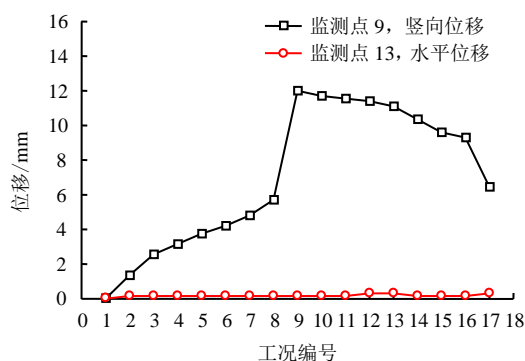


图 4 盾构隧道位移时程响应

Fig.4 Displacement time history response of shield tunnel

### 2.6.2 盾构隧道围土压力分析

将相似材料模型试验围土压力结果恢复至原型, 监测点 1 及监测点 13 围土压力时程响应如图 5 所示, 围土压力分布如图 6 所示, 图 5 及图 6 中正值表示受压。分析图 5 可得, 随着基坑开挖卸荷的进行, 监测点 1 竖向土压力逐步减小, 基坑开挖至底部, 并静置完成后, 土压力降低到最小值, 约为 37.32 kPa; 随着基坑加载的进行, 土压力逐步增加, 基坑加载并静置完成后, 土压力达到 82.43 kPa, 并未恢复原始状态。监测点 13 水平土压力变化趋势与监测点 1 竖向土压力变化趋势基本相同, 土压力极值点出现时间大致相同。分析图 6 可得, 上方基坑开挖卸荷-加载过程中, 盾构隧道围土压力大致呈葫芦型对称分布, 顶部及底部土压力较大, 腰部土压力较小。提取图 6 中, 监测点 1、5、9、13 围土压力值, 并计算基坑开挖卸荷完成及基坑加载完成工况下, 围土压力与初始土压力百分比, 汇总于表 4。分析表可知, 盾构隧道顶部及底部土压力变化幅度较大, 顶部变化幅度大于底部; 盾构隧道两侧土压力变化幅度小于顶部及底部, 但左右两侧土压力变化幅度基本相等。

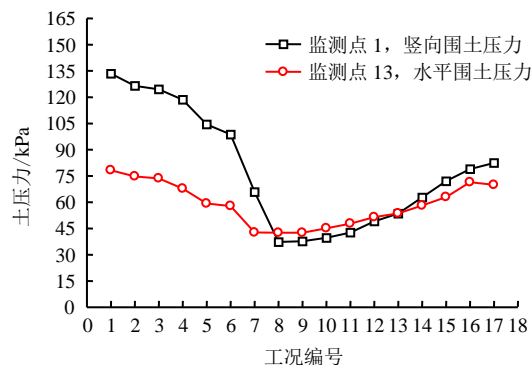
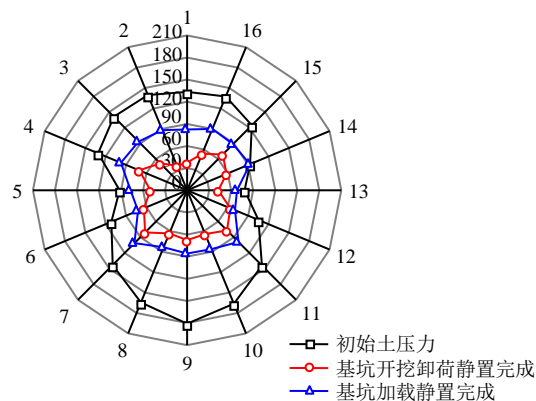


图 5 围土压力时程响应

Fig.5 Earth pressure time history response of shield tunnel



(图中径向坐标表示围土压力 (kPa); 环向坐标表示监测点编号)

图 6 围土压力分布

Fig.6 Distribution of earth pressure



表4 模型试验围土压力对比(单位: kPa)  
Table 4 Comparison of earth pressure in model test (unit: kPa)

监测项目	监测点编号	初始土压力	基坑开挖卸荷完成		基坑加载完成	
			土压力	与初始土压力百分比/%	土压力	百分比/%
竖向土压力	监测点1	133.41	37.32	27.97	82.43	61.79
	监测点9	180.79	67.56	37.36	85.75	47.43
水平土压力	监测点5	91.82	49.91	54.35	76.89	83.74
	监测点13	78.25	42.52	54.34	67.93	86.82

### 3 数值模拟研究

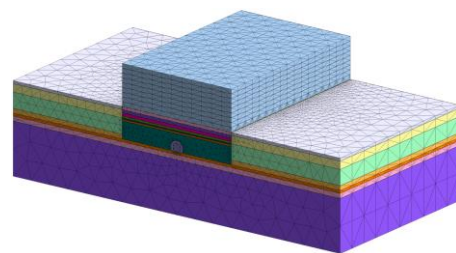
#### 3.1 模型尺寸及网格划分

本文应用 MIDAS/GTS 软件进行数值计算, 基坑外侧地基土体范围及模型厚度取 3 倍以上的基坑深度, 即长、宽、高分别为 120 m×120 m×60 m, 满足忽略边界效应的要求。网格剖分采用线性梯度(长度)的方法, 即通过输入起始单元线和结束单元线的长度, 按线性插值自动设置各节点位置, 以达到盾构隧道及基坑周围网格相对密集, 边界处网格相对稀疏的网格划分效果。整体模型由地上结构部分及地下基坑部分组成, 网格划分如图 7(a)所示, 盾构隧道及基坑支护结构网格划分如图 7(b)所示。

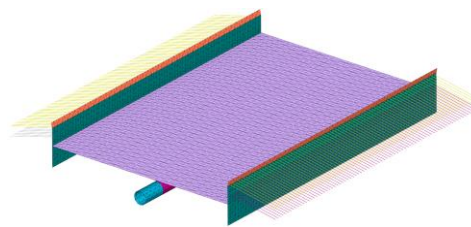
#### 3.2 模型材料参数设定

相比于 Mohr-Coulomb 模型, 修正的 Mohr-

Coulomb 本构模型可以分别设定土体的加、卸载变形模量。依据 MIDAS/GTS 帮助文件及北京地区相关工程经验, 卸荷模量取 3 倍加载模量<sup>[14]</sup>, 能有效地控制基坑开挖时由于应力释放引起的回弹隆起现象, 故本模型中地基土体选用修正的 Mohr-Coulomb 本构模型, 以实体单元建立。具体取值依据对应的地质勘察报告数据, 详见表 5。



(a) 整体模型网格划分



(b) 盾构隧道与基坑支护结构网格划分

图7 数值计算模型网格划分

Fig.7 FEM meshes of calculation model

表5 计算模型物理力学计算参数表  
Table 5 Physical and mechanical parameters of calculation model

岩土类别	厚度/m	压缩模量 /MPa	泊松比	重度 /(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力 /kPa	摩擦角 /(°)	加载模量 /MPa	卸载模量 /MPa
杂填土	2.0	7.0	0.360	18.5	10.0	15.0	7.0	21.0
粘质粉土 I	5.2	7.7	0.250	21.6	21.0	20.7	15.4	46.2
粉质黏土	13.2	9.7	0.260	20.7	28.7	20.6	19.4	58.2
粘质粉土 II	1.8	18.7	0.250	20.6	30.0	23.0	37.4	111.2
中砂	3.2	30.0	0.270	21.0	0.0	30.0	60.0	180.0
圆砾卵石	/	55.0	0.230	22.0	0.0	35.0	110.0	330.0
盾构管片	/	35 000.0	0.167	25.0	/	/	/	/
地下连续墙	/	30 000.0	0.250	25.0	/	/	/	/
锚索	/	200 000.0	0.250	78.0	/	/	/	/
筏板基础	/	30 000.0	0.250	25.0	/	/	/	/

围护结构(地下连续墙、锚索), 盾构隧道, 筏板基础均属于结构构件, 采用弹性本构模型, 地下连续墙及筏板基础采用板单元建模, 盾构隧道采用实体单元建模, 锚索采用植入式桁架单元建模。具体参数按实际值确定, 详见表 5。

#### 3.3 数值计算过程

数值计算工况与相似材料模型试验工况基本相

同, 具体工况见表 6。工况 2 中, 将收敛判别标准调高, 以模拟隧道施工完成后, 隧道周围土体的固结沉降, 逐步达到稳定的状态; 基坑开挖卸荷通过钝化命令实现, 卸荷量总计 186.6 kPa, 与模型试验基本相同; 基坑加载通过激活命令实现, 加载量总计 144 kPa, 与模型试验基本相同; 工况 16 中, 将收敛判别标准调高, 以模拟新建工程施工完成后,

隧道重新及其周围土体重新达到稳定状态。

表 6 数值计算工况

Table 6 Working conditions in the numerical analysis

工况编号	数值计算工况
工况 1	初始应力状态, 位移场清零, 保留应力场
工况 2	盾构隧道施工完成, 位移场清零, 保留应力场
工况 3	土方开挖至-2.0 m
工况 4	放坡、地下连续墙、第 1 道锚索施工
工况 5	土方开挖至-4.0 m
工况 6	土方开挖至-6.0 m
工况 7	第 2 道锚索施工
工况 8	土方开挖至-8.0 m
工况 9	土方开挖至-9.0 m
工况 10	筏板基础施做 (相当于模型试验工况 10)
工况 11	-3~-2 层地下室施做
工况 12	-1 层地下室~1 层结构施做
工况 13	2~3 层结构施做
工况 14	4~5 层结构施做
工况 15	6~7 层结构施做
工况 16	8~9 层结构施做

### 3.4 计算结果与分析

#### 3.4.1 盾构隧道位移分析

盾构隧道监测点 1 竖向位移及监测点 13 水平位移时程曲线如图 8 所示, 盾构隧道腰部断面在基坑开挖卸荷完成及基坑加载完成后的竖向位移及水平位移分布如图 9 所示。图 8、9 中竖向位移正值表示上浮, 水平位移正值表示位移朝左侧支护结构。随着基坑开挖卸荷的进行, 盾构隧道逐步发生上浮, 最大上浮量出现在基坑开挖至底部, 约为 18.8 mm; 随着基坑加载的进行, 盾构隧道逐步下沉, 基坑加载完成后, 总位移量约为 11.41 mm, 并未恢复至最初状态, 若荷载继续增加, 则可能恢复至原状态并持续增大。基坑卸荷-加载过程中, 盾构隧道竖向位移及水平位移呈对称分布, 最大竖向位移出现基坑开挖卸荷完成阶段的隧道顶部, 此时, 盾构隧道顶部与底部竖向位移差约为 3.41 mm; 最大水平位移出现在基坑开挖卸荷完成阶段监测点 13 及监测点 5 位置, 监测点 13 水平位移朝左侧支护结构, 监测点 5 水平位移朝右侧支护结构, 水平位移大小基本相同, 约为 1.7 mm, 左右两侧水平位移差约为 3.4 mm。上方基坑开挖卸荷-加载过程中, 盾构隧道竖向位移与水平位移均呈对称分布, 但竖向位移远大于水平位移, 最大竖向位移差及最大水平位移差均出现在基坑开挖卸荷完成阶段, 若此时, 出现基坑晾槽现象, 则会对盾构隧道造成极为不利的影响。

图 10 所示为模型试验与数值模拟中, 盾构隧道位移结果的对比曲线。图中, 模型试验工况 9 为基坑开挖卸荷完成, 静置至稳定; 工况 17 为基坑加载完成, 静置至稳定; 工况 9 及工况 17 在数值计算中没有相对应工况, 故时程曲线无相对节点。分析图 10 可知, 数值计算结果大于相似材料模型试验结果, 但二者在变化趋势上高度相似, 可互为验证, 数值计算结果有效地弥补了模型试验中, 位移监测点较少的不足。

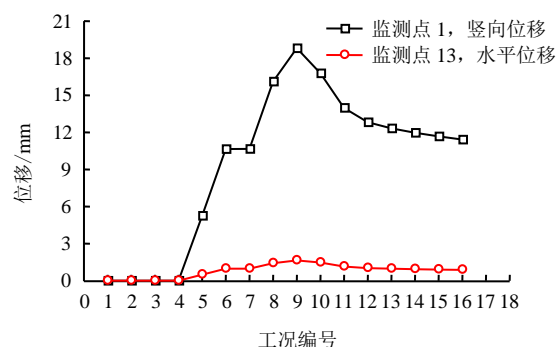
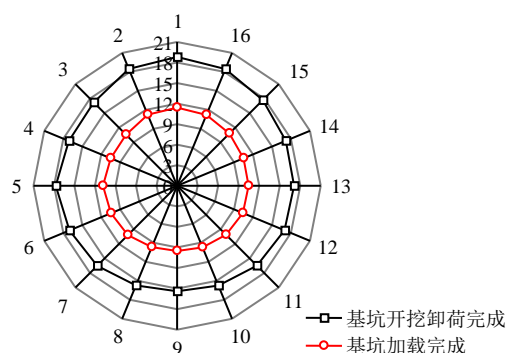
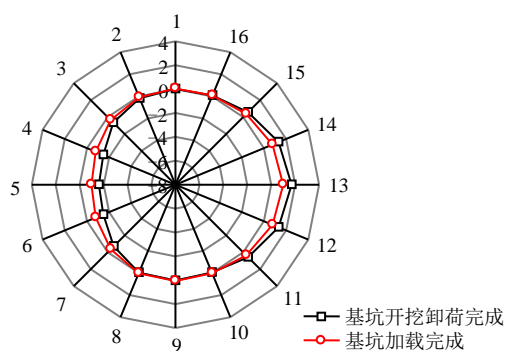


图 8 盾构隧道位移时程响应

Fig.8 Displacement time history response of shield tunnel



(a) 盾构隧道竖向位移



(b) 盾构隧道水平位移

(图中径向坐标表示位移 (mm); 环向坐标表示监测点编号)

图 9 盾构隧道位移分布

Fig.9 Distribution of shield tunnel displacement

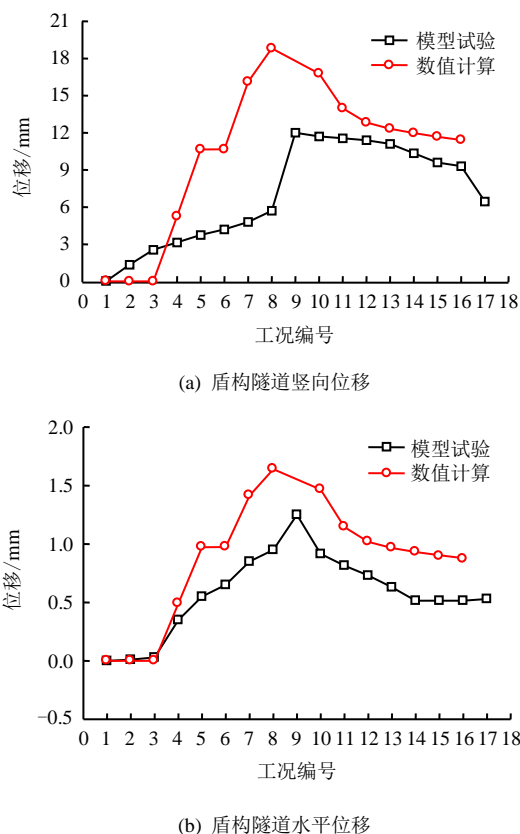


图 10 模型试验与数值计算中盾构隧道位移结果对比  
Fig.10 Comparison between model test and numerical calculation of shield tunnel displacement

### 3.4.2 盾构隧道围土压力分析

盾构隧道监测点 1 竖向土压力及监测点 13 水平土压力时程曲线如图 11 所示, 围土压力分布数值计算结果如图 12 所示, 图中正值表示受压。随着基坑开挖卸荷的进行, 监测点 1 竖向土压力逐步减小, 基坑开挖至底部时, 土压力减小至最小值, 约为 46.31 kPa; 随着基坑加载的进行, 土压力逐步增加, 基坑加载完成后, 土压力达到 120.13 kPa, 并未恢复原始状态。上方基坑开挖卸荷-加载过程中, 盾构隧道围土压力大致呈葫芦型对称分布, 盾构隧道顶部及底部土压力较大, 腰部土压力较小。监测点 13 水平土压力变化趋势与监测点 1 竖向土压力变化趋势基本相同, 但变化幅度远小于竖向土压力。提取图 12 中, 监测点 1、5、9、13 围土压力值, 并计算基坑开挖卸荷完成及基坑加载完成工况下, 围土压力与初始土压力百分比, 汇总于表 7。盾构隧道顶部土压力变化幅度大于底部, 但左右两侧围土压力变化幅度基本相等。基坑开挖卸荷-加载过程中, 盾构隧道围土压力始终呈葫芦型对称分布, 盾构隧道顶部及底部土压力较大, 腰部土压力较小, 基坑开挖卸荷完成后, 长轴方向土压力明显减小, 短轴方

向变化较小; 基坑加载完成后, 土压力有所恢复, 但并未达到最初状态。上方基坑开挖卸荷-加载过程中, 隧道顶部围土压力变化幅度大于隧道底部, 左侧和右侧围土压力变化幅度基本相同。

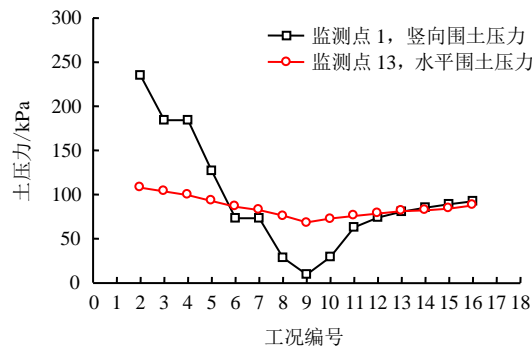
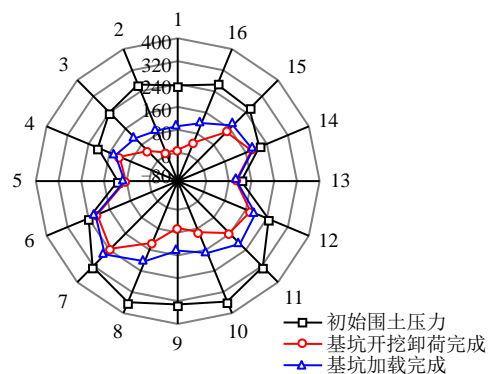


图 11 围土压力时程响应  
Fig.11 Earth pressure time history response of shield tunnel



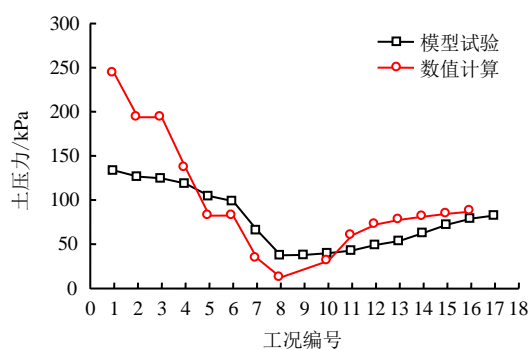
(图中径向坐标表示围土压力 (kPa); 环向坐标表示监测点编号)

图 12 围土压力分布  
Fig.12 Distribution of earth pressure

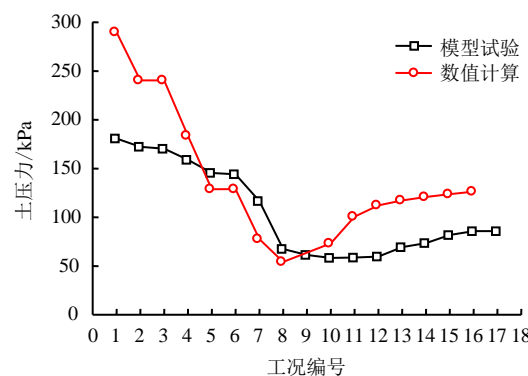
表 7 数值计算围土压力对比 (单位: kPa)  
Table 7 Comparison of earth pressure in numerical calculation (unit: kPa)

监测项目	监测点编号	初始土压力	基坑开挖卸荷完成		基坑加载完成	
			土压力	与初始压力百分比/%	土压力	与初始压力百分比/%
竖向土压力	监测点 1	266.02	46.31	17.41	120.13	45.16
	监测点 9	331.78	63.70	19.19	143.08	43.12
水平土压力	监测点 5	110.98	68.46	61.69	87.72	79.04
	监测点 13	113.82	67.24	59.08	86.26	75.79

图 13 所示为模型试验与数值模拟中, 盾构隧道监测点 1 与监测点 9 围土压力结果的对比曲线。数值计算结果基本上大于相似材料模型试验结果 (部分工况稍小于数值计算结果), 但二者在变化趋势上高度相似, 可互为验证。



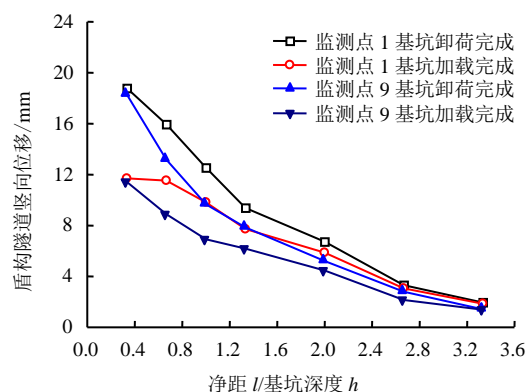
(a) 监测点1围土压力



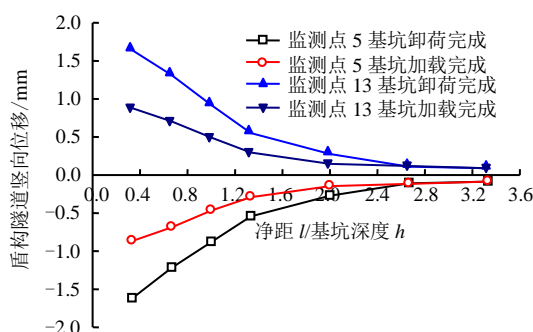
(b) 监测点9围土压力

图13 模型试验与数值计算中盾构隧道围土压力结果对比

Fig.13 Comparisons between model test and numerical calculation of earth pressure



(a) 盾构隧道竖向位移



(b) 盾构隧道水平位移

图14 基坑底部与盾构隧道顶部净距  $l$  的影响

Fig.14 Displacements of shield tunnel under different operating conditions

## 4 关键影响因素分析

### 4.1 基坑底部与隧道顶部净距 $l$ 影响分析

#### 4.1.1 计算工况

随着基坑底部与盾构隧道顶部净距  $l$  的增加, 基坑开挖卸荷-加载对盾构隧道造成的影响会逐步减小。本节深入地分析了净距  $l$  与地铁盾构隧道位移之间的响应规律。基坑底部与盾构隧道顶部净距  $l$  取值依次为3 (模型试验及数值计算工况)、6、9、12、18、24、30 m, 共计7种计算工况。监测点布置与图3相同。

#### 4.1.2 不同净距计算结果与分析

图14所示为基坑底部与盾构隧道顶部净距  $l$  变化时, 基坑开挖卸荷完成及基坑加载完成阶段, 盾构隧道拱顶、拱底竖向位移及两侧水平位移变化曲线。分析计算结果可知: 随着隧道与基坑边缘净距  $l$  的增加, 隧道结构位移逐步减小, 其竖向位移远大于水平位移, 当净距  $l$  大于  $3h$  时, 盾构隧道拱顶及拱底竖向位移变化小于3 mm可以忽略不计。随着净距  $l$  的增加, 盾构隧道结构拱顶与拱底竖向位移差及水平收敛均逐步减小。

### 4.2 基坑加载强度影响分析

#### 4.2.1 计算工况

随着基坑上覆建筑物楼层的增加, 基坑的加载强度越来越大, 对下方盾构隧道造成的影响也会逐步增加。本节深入分析了基坑加载强度与盾构隧道位移之间的响应规律。设定基坑上覆建筑物楼层总数 (包括地下室) 依次为0、3、6、9、12 (工程原型, 3层地下室+9层地上部分)、15、18、21、24、27、30层, 共计11种计算工况, 每层楼荷载按12 kPa考虑, 卸载量总计186.6 kPa。监测点布置与图3相同。

#### 4.2.2 不同加载强度计算结果与分析

图15所示为随着基坑加载强度的变化, 在基坑加载完成阶段, 盾构隧道监测点1及监测点9的竖向位移变化曲线。分析计算结果可知: 在基坑卸荷完成阶段, 即加载量为0 kPa时, 盾构隧道竖向位移呈上浮状态, 约为18.26 mm, 随着基坑加载强度的增加, 盾构隧道竖向位移逐步恢复, 在基坑加载强度为卸载强度的2倍时, 可恢复至最初状态。



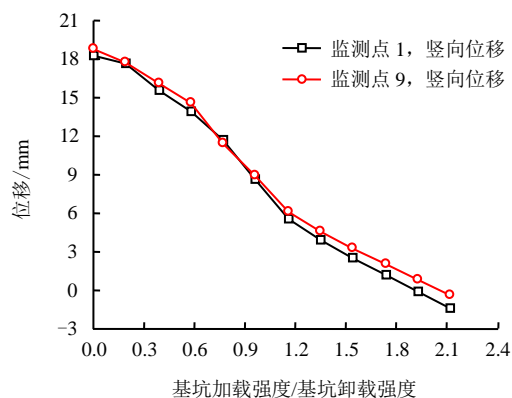


图 15 基坑加载强度的影响

Fig.15 Displacements of shield tunnel under different loading strength of foundation pit

## 5 结 论

(1) 相似材料模型试验结果与数值计算结果在数值上稍有差异,但二者在变化趋势上高度相似,可互为验证,且数值计算结果有效地弥补了模型试验中监测点不足的缺陷。

(2) 盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载过程中,随着基坑开挖卸荷的进行,盾构隧道逐步上浮,基坑开挖至底部时,竖向位移达到最大值,随着基坑加载的进行,竖向位移可得到适量恢复;盾构隧道竖向位移与水平位移均呈对称分布,但竖向位移远大水平位移,最大竖向位移差及最大水平位移差均出现在基坑开挖卸荷完成阶段,此时应尽早进行基础底板施工,避免基坑晾槽的影响。

(3) 基坑开挖卸荷-加载过程中,盾构隧道围土压力始终呈葫芦型对称分布,盾构隧道顶部及底部土压力较大,腰部土压力较小,基坑开挖卸荷完成后,长轴方向土压力明显减小,基坑加载完成后,土压力有所恢复,但并未达到最初状态。上方基坑开挖卸荷-加载过程中,隧道顶部围土压力变化幅度大于隧道底部,左侧和右侧围土压力变化幅度基本相同。

(4) 随着基坑底部与盾构隧道顶部净距  $l$  的增加,盾构隧道结构位移,拱顶与拱底竖向位移差及水平收敛均逐步减小。当净距  $l$  大于  $3h$  ( $h$  为基坑深度)时,上方基坑卸荷-加载对盾构隧道影响逐步趋于轻微。随着基坑加载强度的增加,盾构隧道竖向位移逐步恢复,在基坑加载强度为卸载强度的 2 倍时,可恢复至最初状态。

## 参 考 文 献

[1] 张玉成,杨光华,姚捷,等.基坑开挖卸荷对下方既有

地铁隧道影响的数值仿真分析[J].岩土工程学报,2010,32(增刊1):109—115.

ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, YAO Jie, et al. Numerical simulation and analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(Supp.1): 109—115.

[2] 左殿军,史林,李铭铭,等.深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J].岩土工程学报,2014,36(增刊2):391—395.

ZUO Dian-jun, SHI Lin, LI Ming-ming, et al. Numerical analysis of influence of deep excavations on adjacent subway tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(Supp. 2): 391—395.

[3] 刘国彬,黄院雄,侯学渊.基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J].岩石力学与工程学报,2001,20(3):202—207.

LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, HOU Xue-yuan. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(3): 202—207.

[4] 张伏光,蒋明镜.基坑土体卸荷平面应变试验离散元数值分析[J].岩土力学,2018,39(1):339—348.

ZHANG Fu-guang, JIANG Ming-jing. Distinct element analysis of plane strain test on soil unloading around a foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 339—348.

[5] 贾夫子,王立峰,逯武全,等.基坑开挖对近邻地铁车站和隧道的影响[J].岩土力学,2016,(增刊2):673—678.

JIA Fu-zi, WANG Li-feng, LU Wu-quan, et al. Influence of foundation pit excavation on adjacent metro station and tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, (Supp. 2): 673—678.

[6] 陈郁,李永盛.基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J].地下空间与工程学报,2005,1(1):91—94.  
CHEN Yu, LI Yong-sheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(1): 91—94.