

引用本文:郭院成,张博闻,孟 潮,等.堆土加卸载与基坑开挖叠加对既有隧道变形的影响研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(1):142-149.

GUO Yuancheng, ZHANG Bowen, MENG Chao, et al. Study on influence of soil loading and unloading and foundation pit excavation superposition on existing tunnel deformation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 142-149.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08010

# 堆土加卸载与基坑开挖叠加对既有隧道变形的影响研究

郭院成<sup>1</sup>, 张博闻<sup>1</sup>, 孟 潮<sup>1,2</sup>, 靳军伟<sup>1</sup>, 郜新军<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 水利与土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 华电重工股份有限公司郑州分公司, 河南 郑州 450009)

**摘要:**针对堆土加卸载与基坑开挖叠加效应导致既有地铁隧道变形较大的问题,建立考虑加卸载叠加效应影响的三维空间分析模型,研究不同堆土加卸载叠加基坑开挖卸载模式对邻近地铁隧道变形规律的影响,探讨隧道在堆土加载、移土卸载再叠加基坑开挖下的变形规律。结果表明:正上方堆土加卸载对隧道的竖向位移影响较大,是侧向堆土加卸载的 3 倍~5 倍;在经历堆土加卸载后,隧道会残留不可忽视的变形,其残留竖向位移约为加载后位移的 62%;堆土加卸载叠加侧方基坑开挖时,隧道变形受基坑开挖深度的影响较大,大于隧道埋深的开挖阶段会加剧隧道变形;4 种叠加模式中,正上方堆土加卸载-侧方基坑开挖卸载隧道最终竖向位移最大,约 17 mm,侧方堆土加卸载-异侧基坑开挖卸载隧道最终水平位移最大,约 8 mm,邻近隧道施工时应充分考虑叠加效应的影响,尽量避免这两种情况。

**关键词:**地铁隧道;变形;基坑开挖;数值模拟;堆土加卸载;叠加作用

中图分类号: TU92

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)01-0142-08

## Study on influence of soil loading and unloading and foundation pit excavation superposition on existing tunnel deformation

GUO Yuancheng<sup>1</sup>, ZHANG Bowen<sup>1</sup>, MENG Chao<sup>1,2</sup>, JIN Junwei<sup>1</sup>, GAO Xinjun<sup>1</sup>

(1. School of Hydraulic and Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2. Zhengzhou Branch, Huadian Heavy Industries Co., Ltd., Zhengzhou 450009, Henan, China)

**Abstract:** Considering the problem of large deformation of existing subway tunnel caused by the superposition effect of soil loading and unloading and foundation pit excavation, a three-dimensional spatial analysis model was established by considering the influence of loading and unloading superposition effect. The influence of different superposition modes of soil stacking loading and unloading and foundation pit excavation on the deformation law of the tunnel was studied, and the deformation laws of tunnel under soil loading, unloading and foundation pit excavation were analyzed. The results show that the influence of soil loading and unloading above the tunnel has a great influence on the vertical displacement of the tunnel, and the influence of soil loading and unloading on the tunnel vertical displacement is 3 to 5 times of that on the side.

收稿日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078469)

作者简介: 郭院成(1965-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: guoyuancheng@163.com。

After the loading and unloading, the residual deformation of the tunnel cannot be ignored, and the residual vertical displacement is about 62% of the displacement after loading. The excavation depth has a great influence on the deformation of the tunnel when the soil loading and unloading is superimposed on the excavation of the side foundation pit. When the excavation depth exceeds the buried depth of the tunnel, the deformation of the tunnel will develop in a more unfavorable direction. Among the four superposition modes, the final vertical displacement of the tunnel from the loading and unloading of soil directly above to the excavation and unloading of side foundation pit is the largest, about 17 mm, and the final horizontal displacement of the tunnel from the soil loading and unloading laterally to the excavation and unloading of foundation pit on the opposite side is the largest, about 8 mm. The influence of superposition effect should be fully considered during the construction of adjacent tunnels to avoid these two situations as far as possible.

**Key words:** subway tunnel; deformation; foundation pit excavation; numerical simulation; soil loading and unloading; superposition effect

## 0 引言

近年来,由于地上建筑物、道路、铁路、土方堆积及滑坡等超额附加荷载导致的隧道失稳事故频发,其中土方堆积是引发隧道事故的主要原因之一<sup>[1]</sup>;同时地表卸载所造成的土体回弹会导致隧道产生变形;若开挖引起的隧道结构变形超过容许范围,可能会导致隧道结构受损。因此,揭示地面加载和土体卸载下隧道的变形机理,对确保隧道及周围设施的安全至关重要。

目前,已有众多学者通过理论分析、数值模拟和试验研究来评估土体加卸载对隧道的影响。李春良等<sup>[2]</sup>、黄栩等<sup>[3]</sup>、Wu 等<sup>[4]</sup>、张治国等<sup>[5]</sup>从理论计算方面出发建立了考虑地面荷载变化影响的地铁受力模型,并给出隧道变形和内力的解析解;Liang 等<sup>[6]</sup>通过修正 Pasternak 地基模型的模量得到了一种预测盾构隧道邻近开挖行为的变形计算方法;Cheng 等<sup>[7]</sup>提出了一种用于分析侧邻深基坑开挖对隧道纵向和环向变形影响的简化方法,同时能预测开挖对隧道的破坏程度。室内模型试验是研究大型岩土工程稳定性的常用方法,其重复性和成本效益都优于现场测试,同时可以在试验过程中有效监测变形和应力,因此得到了广泛应用<sup>[8]</sup>。室内试验可以研究影响隧道行为的最相关因素,并且测试结果可以为数值分析提供依据<sup>[9]</sup>;黄大维等<sup>[10]</sup>通过模型试验发现上覆土层的力学性能对隧道变形有较大影响;梁发云等<sup>[11]</sup>结合实际工程,通过离心模型试验得到了隧道和地下连续墙在基坑开挖过程中的变形特性。数值模拟可以考虑到复杂的土体本构关系和隧道开挖过程,因而被认为是研究隧道变形机理的首选方

法<sup>[12]</sup>。诸多学者采用数值分析的方法对隧道变形随土体加载和卸载的发展规律进行了研究<sup>[13-18]</sup>;陆培毅等<sup>[19]</sup>基于实际工程对比了在数值模拟中采用两种不同本构模型时结果的准确性,同时研究了堆载位置对隧道变形的影响;Cheng 等<sup>[20]</sup>研究了郑州东高铁站东广场在隧道两侧进行基坑开挖的案例,分析了各施工阶段对隧道隆起和变形的贡献。

堆土加卸载和基坑开挖均会使隧道产生较大变形,二者叠加作用下影响更为显著。目前国内外学者已对邻近既有隧道单一加载或者卸载情况进行了广泛研究,而对于堆土加卸载和基坑开挖叠加效应对隧道变形影响研究较少。本文基于郑州某地下空间综合利用工程建立三维数值模型,通过与现场监测数据进行对比验证了模型的有效性,考虑隧道与堆土和基坑的空间位置关系,提出 4 种叠加模式,研究不同模式对隧道变形的影响。

## 1 数值分析建模方法

### 1.1 工程概况

某地下空间综合利用工程位于郑州东高铁站东广场,需在服役地铁附近开挖基坑,由于服役地铁隧道上方附近区域存在大量堆土,在基坑施工前需将堆土进行卸载;堆土为两层,长 183 m,宽 174 m,首层高 3 m,二层高 11 m;隧道两侧基坑对称开挖,且大小及深度保持一致,均为长 270 m,宽 110 m,首层深 6.5 m,二层深 11 m,隧道与堆土和基坑的位置关系如图 1 所示。

### 1.2 数值模拟计算模型

为准确地研究地铁隧道在堆土加卸载和基坑开挖卸载整个过程所引起的地铁隧道变形,本文数值

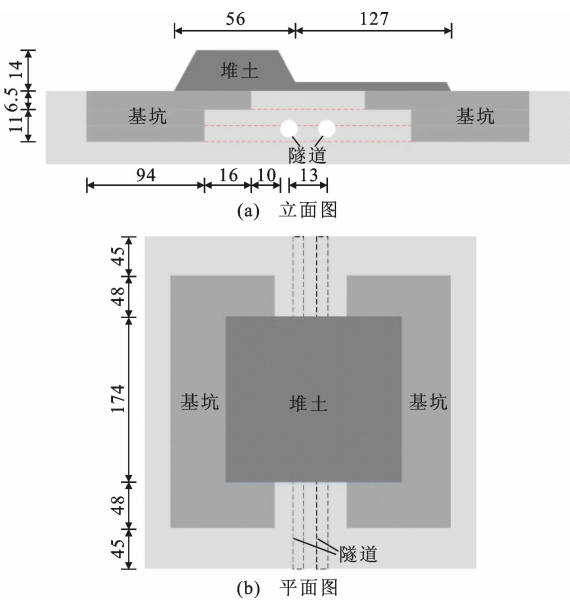


图 1 模型简图(单位:m)

Fig.1 Model diagram (unit:m)

模拟中土体采用修正摩尔-库仑模型。该模型采用三轴试验割线模量  $E_{50}$ 、主压密试验切线模量  $E_{oed}$ 、卸载再加载模量  $E_{ur}$ 来描述岩土强度。

在建立模型时对土体情况进行简化处理,假定每一土层在模型范围内均匀分布,参考工程地质勘察报告将土体力学指标相似的土层进行合并,简化后土体参数如表 1 所示,该本构模型的 3 个土体刚度参数取  $E_{50}=E_{oed}=E_0$ ,  $E_{ur}=3E_{50}$ 。

表 1 土体参数

Table 1 Parameters of soil

土层	厚度 $H/m$	重度 $\gamma/$ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	泊松 比 $\nu$	弹性模量 $E_0/MPa$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
① <sub>2</sub>	4.5	19.0	0.3	4.5	15	22
④	9.7	19.3	0.3	11.3	15	23
⑥ <sub>1</sub>	21.0	20.3	0.3	21.5	1	27
⑨	3.5	20.0	0.3	10.0	29	21
⑩	11.3	20.0	0.3	21.6	2	28

结合工程实际情况,本文基坑采用地连墙结合一道水平支撑的支护结构,同时采用临时格构柱作为水平支撑体系的竖向支撑构件,假定地铁隧道结构的变形以及基坑支护结构的受力变形均在弹性范围以内,结构单元材料参数取值和模型分别如表 2 和图 2 所示。有限元计算模型如图 3 所示。

根据实际工程的各阶段,有限元计算步骤如表 3 所示。

1.3 模拟结果与实测结果对比分析

本文定义隧道发生位移时以向上和向右为正方向。图 4 为隧道竖向位移实测值与模拟值的对比,

表 2 结构单元材料参数取值

Table 2 Parameter values of structural unit material

材料	厚度 $H/m$	重度 $\gamma/$ ( $kN \cdot m^{-3}$ )	弹性模量 $E_0/GPa$	泊松比 $\nu$
盾构管片	0.35	25	30	0.2
地下连续墙	0.80	25	30	0.2
水平支撑		28	30	0.2
格构柱		28	30	0.2

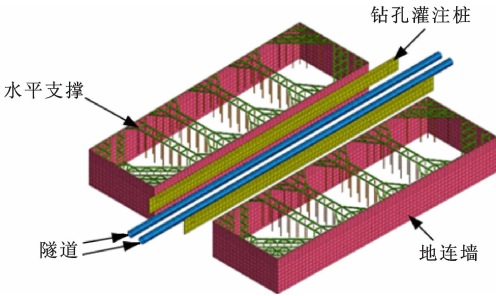


图 2 结构单元有限元模型

Fig.2 Structural element finite element model

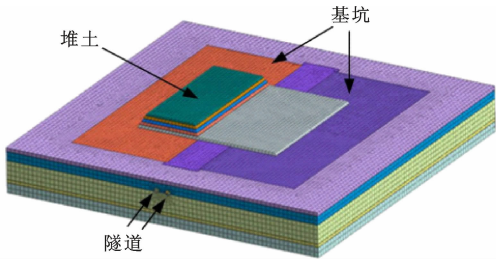


图 3 有限元计算模型

Fig.3 Finite element calculation model

在堆土加载结束后左线隧道顶部竖向位移实测值与模拟最大值分别为  $-27.4\text{ mm}$  和  $-27.2\text{ mm}$ ,两者基本上相等;从基坑开挖前到基坑开挖至  $-2\text{ m}$  过程,左线隧道顶部竖向位移的实测值与模拟值差值较小,均在  $1\text{ mm}$  之内。实测与模拟存在差值的原因可能是模拟中将现场堆土及地层情况进行了简化处理而导致的。因此本文所建立的模型可用来研究在堆土加卸载叠加与基坑开挖情况下隧道的变形情况。

2 堆土加卸载与基坑开挖叠加效应分析

2.1 叠加模式分类

堆土和基坑开挖位于隧道不同空间位置时,隧道的变形情况会存在较大差异,如图 5 所示。当堆土和基坑开挖对隧道产生的变形模式相同时,隧道横向变形可能显著增加,从而超出隧道的控制标准。

根据上述隧道与基坑和堆土的典型位置,本文

表 3 分析步骤  
Table 3 Analysis steps

工况编号	模拟内容	示意图
1	地应力平衡	
2	盾构隧道开挖	
3	堆土加载至 3 m	
4	堆土加载至 6 m	
5	堆土加载至 9 m	
6	堆土加载至 12 m	
7	堆土加载至 14 m	
8	堆土卸载 2 m	
9	堆土卸载 5 m	
10	堆土卸载 8 m	
11	堆土卸载 11 m	
12	堆土卸载 14 m	
13	基坑开挖至-2 m	
14	基坑开挖至-6.5 m	
15	支护结构施工	
16	基坑开挖至-12 m	
17	基坑开挖至-17.5 m	

将堆土加卸载与基坑开挖卸载的叠加分为 4 种模式,如图 6 所示。

2.2 不同叠加模式作用效应

本节重点分析 4 种叠加模式作用对隧道中心截面变形的影响,每种叠加作用模式均有 4 个施工阶段:堆土加载、堆土卸载、基坑支护结构施工和基坑开挖,具体施工工况模拟如表 4 所示。模型中堆土下表面的长度设为 130 m,宽度设为 60 m,堆土坡度设为 60°;基坑开挖长 130 m、宽 60 m;隧道直径为 6 m,埋深为 10 m;侧方堆土和基坑边缘与隧道边缘的水平距离均为 10 m;模型尺寸为长 250 m、宽 180 m、深 50 m。根据前人研究得知,正上方堆土加载对隧道变形影响较大,因此正上方堆土仅加载至 6 m;土体及结构单元参数依照表 1 取值。

2.2.1 模式一

图 7 为模式一下隧道各阶段的位移变化曲线。

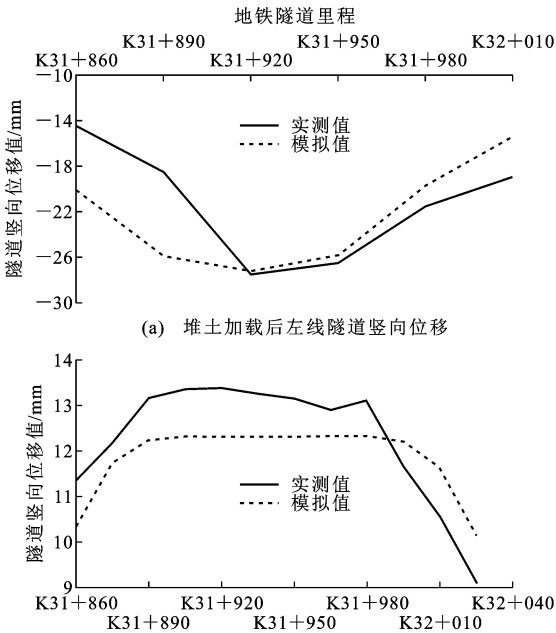


图 4 隧道竖向位移实测值与模拟值对比  
Fig. 4 Comparison of measured and simulated results of tunnel vertical displacement

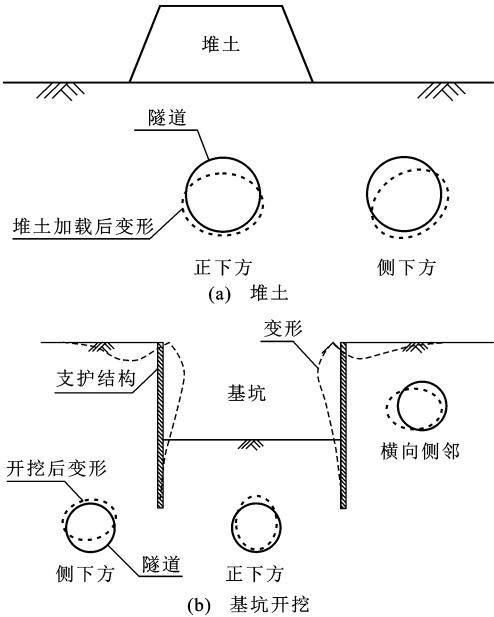


图 5 隧道典型位置示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of typical location of tunnel

从图 7 可以看出:隧道的竖向位移随堆土高度的增加而逐渐增大,由于是正上方堆土,水平向为拉伸变形,加载后呈横向的椭圆形状;在堆土卸载阶段,隧道 4 个控制端点的竖向和水平向位移逐渐减小,但即使堆土完全卸载后,隧道位移仍不能恢复至加载前的初始状态,残留竖向位移约为最大值的 55%;基坑开挖可进一步减小隧道的变形,且基坑深度达

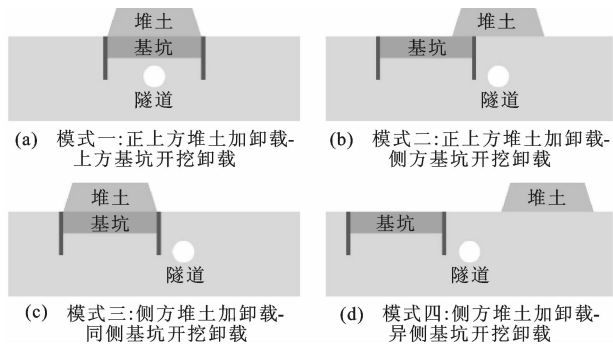


图 6 叠加模式分类

Fig. 6 Classification of superposition modes

表 4 施工工况

Table 4 Construction status

模式	堆土加载	堆土卸载	基坑支护 结构施工	基坑开挖
模式一	工况 2~4(6 m)	工况 5~7	工况 8	工况 9~10(7 m)
模式二	工况 2~4(6 m)	工况 5~7	工况 8	工况 9~13(16 m)
模式三	工况 2~6(10 m)	工况 7~11	工况 12	工况 13~17(16 m)
模式四	工况 2~6(10 m)	工况 7~11	工况 12	工况 13~17(16 m)

注:括号内数字为堆土加载高度及基坑开挖深度。

到 7 m 时隧道位移基本归零。同时由于隧道的收敛变形和伸长变形最大值分别位于水平方向以及竖向方向,因此其变化趋势与隧道竖向位移和水平向位移一致。

2.2.2 模式二

图 8 为模式二下隧道各阶段的位移变化曲线。对比模式一,因堆土位置一致,在堆土加卸载阶段二者位移变化相同,但在基坑开挖结束后,该模式下隧道仍有较大的竖向变形,约 17 mm,原因在于正上方堆土对隧道竖向变形影响较大,而侧方开挖对减小隧道竖向位移贡献较小。同时,从图 8 可以看出,堆土加卸载使隧道产生较大水平向拉伸变形,基坑开挖阶段使隧道整体向左移动,二者叠加后隧道左端点有较大水平位移,因此隧道水平位移在基坑开挖结束后不能恢复至初始状态。

隧道收敛变形与伸长变形最大值均出现在堆土加载后,分别为 8 mm 及 7.3 mm;基坑开挖前期对隧道径向位移影响相对较小,当基坑开挖深度小于隧道埋深时,隧道径向位移基本不发生改变,但在开挖深度超过隧道埋深后,隧道的径向位移又开始向不利方向发展。

2.2.3 模式三

图 9 为模式三下隧道各阶段的位移变化曲线。从图 9 可以看出:在侧方堆土完全卸载后,隧道位移同样不能恢复至初始状态,残留竖向位移约为最大

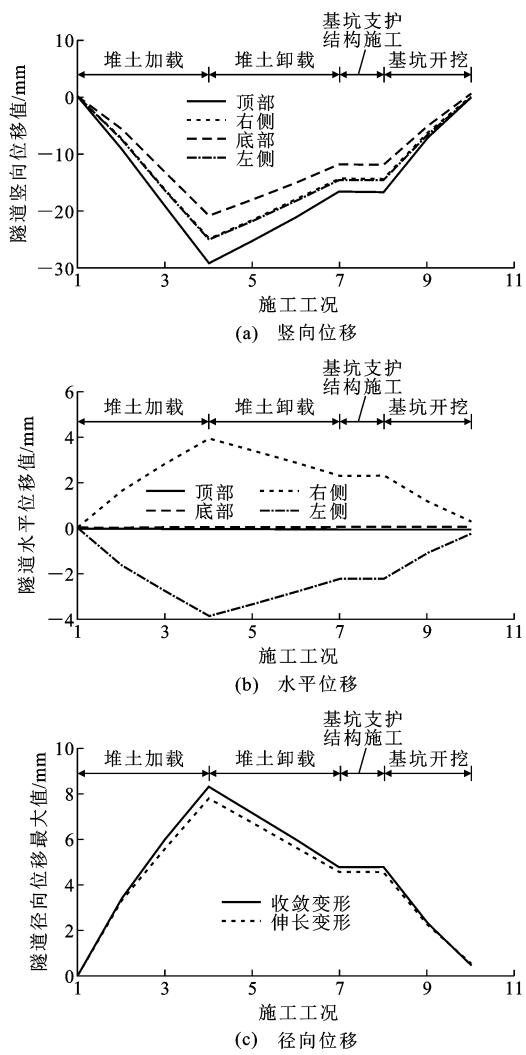


图 7 模式一隧道位移变化曲线

Fig. 7 Tunnel displacement curves of mode 1

值的 62%。对比模式一、二可以发现,正上方堆土加卸载对隧道的竖向位移影响较大,是侧向堆土加卸载的 3 倍~5 倍。当开挖深度较小时,隧道的竖向和水平向位移逐渐恢复,向初始状态发展;随着开挖的持续进行,当达到隧道埋深附近时,隧道竖向位移转而开始快速增加;隧道各节点在基坑开挖阶段始终发生朝向基坑方向的水平位移,其变化速率在达到隧道埋深附近时稍有增加;与模式二相同,隧道水平位移在基坑开挖卸载后达到最大值,认为侧向基坑开挖对隧道水平位移影响显著。

在基坑开挖初期,隧道径向位移随开挖深度的增加逐渐减小;随着开挖的持续进行,当达到隧道埋深附近时,隧道径向位移转而开始快速增加,这是由于隧道与基坑的位置关系从隧道位于基坑的斜下方变为横向侧邻;在基坑开挖结束后隧道收敛变形和伸长变形达到最大值,分别为 3.3、3.4 mm;由于侧

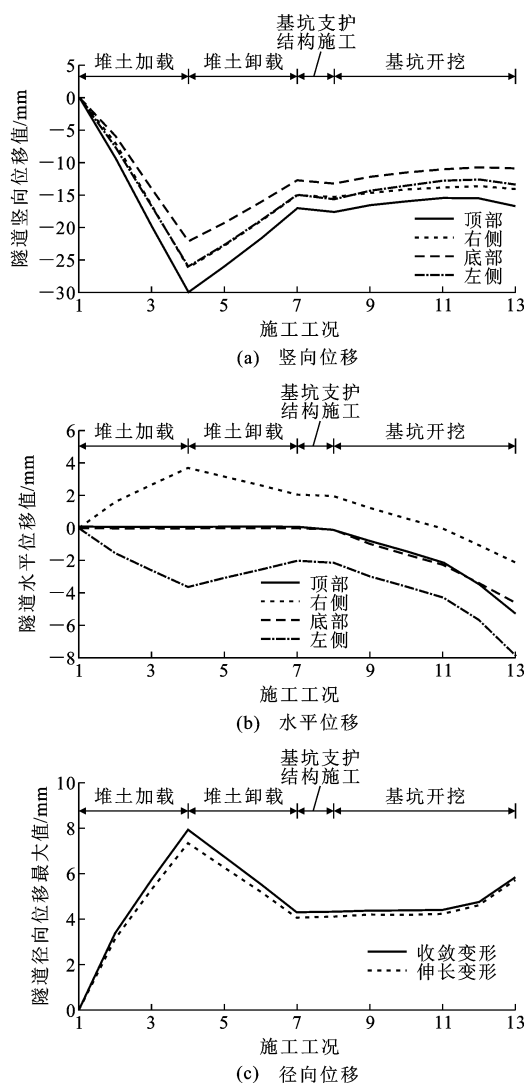


图 8 模式二隧道位移变化曲线

Fig. 8 Tunnel displacement curves of mode 2

向加载对隧道的影响小于正上方加载,因而叠加后该模式隧道径向位移小于模式二。在该模式下应尽量避免基坑开挖深度大于隧道埋深,从而可以有效控制隧道的变形。

#### 2.2.4 模式四

图 10 为模式四下隧道各阶段的位移变化曲线。可以发现,隧道竖向位移的变化趋势在整个阶段与模式三基本一致,但该模式下隧道的最终竖向位移较大;与模式三相比,隧道在施工结束后最终的水平位移增大 47.1%,主要原因是在堆土加卸载后隧道仍残余有朝向基坑侧的水平位移,该位移与基坑开挖对隧道的的影响趋势相同,因此二者叠加后使得隧道最终的水平位移显著增加。

从图 10 可以看出:基坑开挖阶段隧道收敛变形的最大值基本呈线性增加,而伸长变形最大值在前期增加缓慢,当达到隧道埋深后开始快速增加;与模

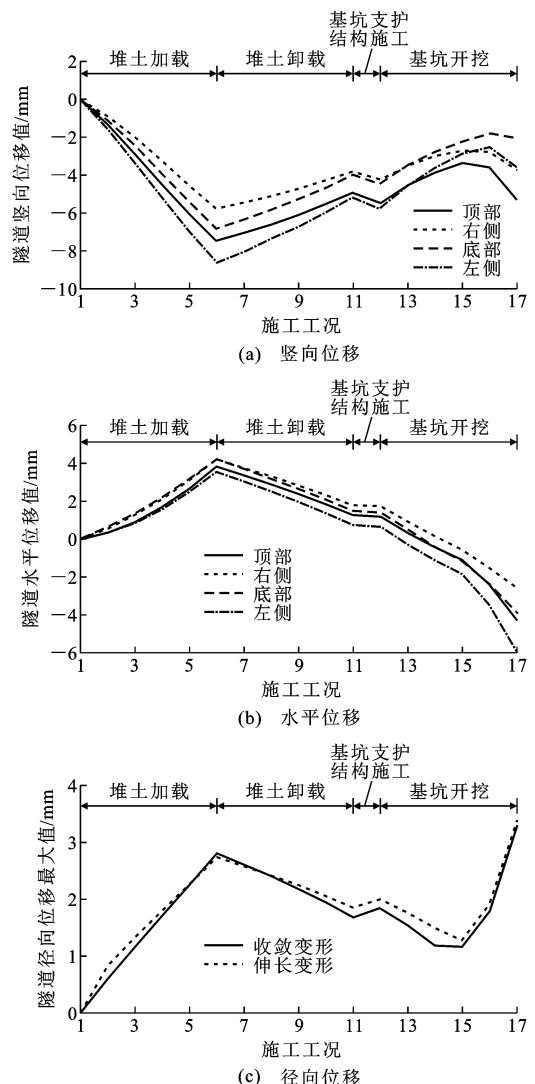


图 9 模式三隧道位移变化曲线

Fig. 9 Tunnel displacement curves of mode 3

式三相比,在基坑开挖结束时其收敛变形最大值有所增加,而伸长变形最大值有所减小。

### 3 结 语

(1)堆土加载后即使完全移除土体,隧道竖向位移和水平位移也不能恢复至初始状态,且正上方堆土加卸载对隧道变形的影响远大于侧方堆土加卸载。

(2)不同叠加模式下,隧道变形相差较大。对于需在隧道侧向进行基坑开挖的情况,预先在隧道正上方进行堆土加卸载,隧道的最终竖向位移最大;预先在基坑同侧进行堆土加卸载,竖向位移最小;堆土加卸载位置对水平位移影响相对较小。

(3)堆土加卸载叠加侧方基坑开挖时,基坑开挖深度对隧道变形的影响较大。在基坑开挖阶段,隧道竖向位移随开挖的进行先减小后增大,转折点位

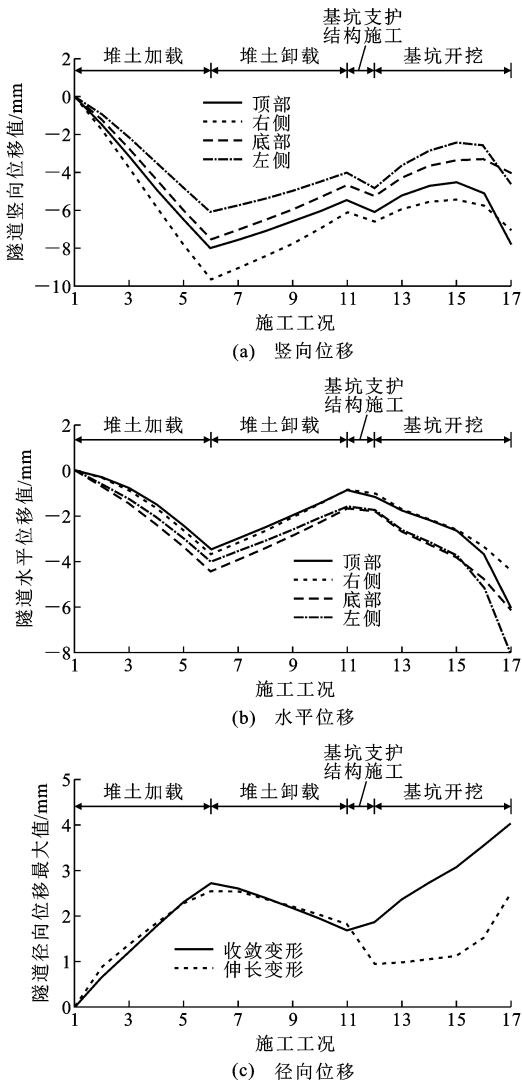


图 10 模式四隧道位移变化曲线

Fig. 10 Tunnel displacement curves of mode 4

于隧道埋深附近;当开挖深度超过隧道埋深后,隧道变形均朝向更不利方向发展;在分析隧道变形时,应充分考虑开挖深度带来的影响。

### 参考文献:

### References:

[1] HUANG F, WU C Z, JANG B A, et al. Instability mechanism of shallow tunnel in soft rock subjected to surcharge loads [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103350.

[2] 李春良, 王国强, 赵凯军, 等. 地面荷载作用盾构隧道纵向力学行为[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(增 2): 180-184.

LI Chunliang, WANG Guoqiang, ZHAO Kaijun, et al. Vertical mechanical behavior on shield tunnel under loads on ground surface[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),

2011, 41(S2): 180-184.

[3] 黄 栩, 黄宏伟, 张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1241-1249.

HUANG Xu, HUANG Hongwei, ZHANG Dongmei. Longitudinal deflection of existing shield tunnels due to deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1241-1249.

[4] WU H N, SHEN S L, LIAO S M, et al. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 317-323.

[5] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1373-1380.

ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1373-1380.

[6] LIANG R Z, WU W B, YU F, et al. Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 94-105.

[7] CHENG H Z, CHEN R P, WU H N, et al. A simplified method for estimating the longitudinal and circumferential behaviors of the shield-driven tunnel adjacent to a braced excavation [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103595.

[8] HUANG F, WU C Z, JANG B A, et al. Instability mechanism of shallow tunnel in soft rock subjected to surcharge loads [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99: 103350.

[9] MEGUID M A, SAADA O, NUNES M A, et al. Physical modeling of tunnels in soft ground: a review [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 185-198.

[10] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 942-949.

HUANG Dawei, ZHOU Shunhua, FENG Qingsong, et al. Experimental study on influences of surface surcharge on existing shield tunnels buried in soft and hard soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 942-949.

[11] 梁发云, 褚 峰, 宋 著, 等. 紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 657-664.

LIANG Fayun, CHU Feng, SONG Zhu, et al. Centrif-

- ugal model test research on deformation behaviors of deep foundation pit adjacent to metro stations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 657-664.
- [12] CHEN R P, MENG F Y, YE Y H, et al. Numerical simulation of the uplift behavior of shield tunnel during construction stage[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(2): 370-381.
- [13] 邵 华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1036-1043.
- SHAO Hua, HUANG Hongwei, ZHANG Dongming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1036-1043.
- [14] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1092-1101.
- WANG Rulu, ZHANG Dongmei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1092-1101.
- [15] 孙中菊. 地面堆载作用下埋地管道的力学性状分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- SUN Zhongju. Analysis on mechanical characteristics of buried pipelines under surcharge loads [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [16] 石钰锋, 方 焘, 王海龙, 等. 基坑开挖引起紧邻地铁隧道力学响应与处理方案研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(6): 1100-1107.
- SHI Yufeng, FANG Tao, WANG Hailong, et al. Research on mechanical response and countermeasures of subway tunnel induced by adjacent excavation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(6): 1100-1107.
- [17] 裴行凯. 深基坑开挖对临近既有地铁隧道的纵向影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(1): 205-210.
- PEI Xingkai. Numerical analysis of influences of excavation on adjacent tunnels[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(1): 205-210.
- [18] 戴志仁. 地表大范围开挖卸载引起下卧盾构隧道管片碎裂机理研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(4): 62-69.
- DAI Zhiren. Study on mechanism of segment crack and fracture of underlying shield tunnel caused by extensive excavation and unloading of ground surface [J]. China Railway Science, 2017, 38(4): 62-69.
- [19] 陆培毅, 王美苓, 杨建民. 软土地区地面堆载对盾构隧道变形的影响分析[J]. 建筑结构, 2019, 49(增2): 999-1003.
- LU Peiyi, WANG Meiling, YANG Jianmin. Influences of surface surcharge on the deformation of shield tunnel in soft ground area[J]. Building Structure, 2019, 49(S2): 999-1003.
- [20] CHENG W C, SONG Z P, TIAN W, et al. Shield tunnel uplift and deformation characterisation: a case study from Zhengzhou metro[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79: 83-95.