

土岩组合地层基坑开挖对下卧隧道变形 影响模拟分析

曾 力¹,杨景辉¹,李明宇¹,马朋辉¹,朱 翔²

(1. 郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450001;2. 黄河科技学院建筑工程学院,河南 郑州 450000)

摘 要 目的 以济南 CBD 中心绸带路-礼耕路站区间基坑工程为背景,探究土岩组合地层中基坑开挖对下卧隧道运营安全影响。方法 通过三维数值模拟着重分析土岩组合地层中土岩分界面上下岩土强度参数黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和弹性模量 E 、土岩交界面位置、围护桩嵌固深度等变化对隧道变形的影响规律。结果 基坑开挖下卧隧道拱顶和拱底均向上浮动,拱腰向内压缩;当土岩分界面处于基坑开挖范围内时,改变土岩地层强度和刚度参数、围护桩嵌固深度、对隧道变形影响较弱;随着土岩组合地层分界面从基坑范围下移到坑底以下隧道拱顶以上以及隧道开挖范围内,隧道拱顶上浮增幅度会逐渐非线性增大,收敛变形会线性增加。结论 土岩组合基坑开挖相较于纯土层基坑开挖对下卧隧道影响显著减小,但受土岩组合设计参数影响大。

关键词 隧道工程;土岩组合;基坑开挖;运营隧道;竖向位移;收敛变形

中图分类号 TU47

文献标志码 A

Numerical Analysis of Influence of Foundation Pit Excavation on Deformation of Underlying Tunnel in Soil-Rock Combination Stratum

ZENG Li¹, YANG Jinghui¹, LI Mingyu¹, MA Penghui¹, ZHU Xiang²

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, China, 450001; 2. School of Civil Engineering, Yellow River Institute of Science and Technology, Zhengzhou, China, 450000)

Abstract: This paper was proposed in order to explore the influence of foundation pit excavation on the operation safety of the underlying tunnel in the soil-rock combination stratum, based on taking the foundation pit engineering between Silk Road and Ligen Road station in Jinan CBD center as the background. Through three-dimensional numerical simulation, the influence of soil strength parameters c , internal friction angle φ and elastic modulus E , the position of soil-rock interface and the embedment depth of retaining pile on tunnel deformation in soil-rock combination stratum were analyzed emphatically. Both the vault and bottom of the tunnel floated upward, and

收稿日期:2022-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41972270)

作者简介:曾力(1972—),男,副教授,博士,主要从事隧道及地下建筑施工技术理论方面研究。

the arch waist compressed inward. When soil rock interface was in foundation pit excavation scope, changing the soil rock formation strength and stiffness parameters, retaining pile built in depth, had less effect on deformation of tunnel rock combination with soil formation interface from which the range down to the bottom of foundation pit and tunnel vault, and within the scope of tunnel excavation, the tunnel vault buoyancy increase growth rate will gradually nonlinear, convergence deformation will increase linearly. The excavation of soil-rock combination foundation pit has less influence on the underlying tunnel than that of pure soil, but it is greatly influenced by the design parameters of soil-rock combination.

Key words: tunnel engineering; soil-rock combination; foundation pit excavation; operating tunnels; vertical displacement; convergence deformation

在密度城区进行大规模地下空间开发过程中,往往上部基坑开挖对既有运营隧道的安全带来不利影响,就此方面近些年做了大量研究,其中理论分析方面,刘建文等^[1-3]多数借助 Mindlin 解计算方法,建立了基坑开挖的卸荷方程,给出了盾构隧道纵向位移的控制方程,并给出了隧道纵向位移、环间转角、环间错台量和剪切力等计算方法。而数值模拟方面, Meng Fanyan 等^[4-6]分析了基坑下力学响应区及既有隧道在不同竖向相对位置下对基础水平的响应与拱形效应的关系、缓解下卧隧道变形方法的有效性、隧道变形规律和土体应力分布。室内模型试验方面,陈仁朋等^[7-11]通过相近试验和离心机模型试验,分析了单一地层开挖方式变化对地层位移场和隧道变形和受力的影响规律,根据基坑与地铁隧道的不同位置关系得到基坑开挖卸荷四种作用模式:上方卸荷模式、侧方浅部卸荷模式、侧方中部卸荷模式和侧方深部卸荷模式。除此之外,林杭等^[12]研究得到了隧道变形随着基坑开挖深度和宽度的变化规律,基坑开挖卸荷引起的土体应力重分布使得坑底隆起,进而使得下卧隧道隆起,而地基加固能有效改善土体的抗隆起能力,并与加固土体的模量有关。目前对此方面的研究较多,更多研究只关注单一土层的情况,但土岩组合地层中多数选用的嵌岩桩+锚杆(或土钉)支护形式与土层中内支撑(锚杆或土钉)+围护桩(墙)的支护形式不同,如嵌岩

桩的桩端往往在基坑开挖面以上,基坑的整体稳定性、抗滑移稳定性、抗隆起稳定性与嵌固深度密切相关,导致两种支护体系的变形特征和受力状态上的差异。土岩分界面与隧道相对位置变化的影响,如围护墙与外侧土岩体最大水平位移均发生在土岩结合面附近^[13],土岩复合基坑的变形因场地分布的土岩交界面深度不同而表现出明显的空间特性^[14],造成了土岩组合地层特殊支护体系下基坑开挖过程中下卧隧道变形变化规律及分布特征,与现有文献^[15-19]中相似工况分析结果上的差异,而目前对于这种特殊地层和特殊支护形式下基坑上跨既有隧道的研究少之甚少。

基于此,笔者以济南市中央商务区(CBD)建设中绸带路站-礼耕路站地铁隧道工程为分析对象,从设计方案优化角度,通过三维数值模拟系统地土岩组合地层中嵌岩桩+锚杆支护型式下基坑开挖对下卧隧道的影响进行分析,并着重讨论围护桩嵌岩深度、土岩分界面与隧道相对位置、土与岩相对刚度等参数变化对隧道纵向变形和收敛变形的影响规律,为优化设计提供理论支撑。

1 数值分析模型

1.1 数值分析模型的建立

依托济南市市政轨道交通工程绸带公园站~礼耕路站区间地铁隧道工程,该项目位于山东省济南市 CBD 区域横七路下方,沿东

西向布置,包括地下一层箱型结构及其下方的暗挖区间结构。施工时先采用明挖法施建箱型结构,完成后及时覆土。明挖基坑上跨已建双线隧道,其工程地质条件复杂,由土岩组合地层构成,主要呈现“上软下硬”特征。以下卧隧道右线里程为准,明挖基坑区间设计里程范围为 K33 + 440 ~ K33 + 360,基坑长×宽×高为 30 m×26.4 m×9.25 m。基坑开挖方案左右线隧道外侧距离基坑中心的水平距离分别为 6.2 m,9.4 m,如图 1 所示。基坑围护结构采用钻孔灌注桩 $\Phi 800@1\ 500$,桩长 13.85m;冠梁长×宽为 1 100 mm×800 mm,砼支撑长×宽为 800 mm×800 mm。主要地层分别为黏土层、胶结砾岩、全风化泥灰岩、强风化闪长岩、中风化灰岩。三维数值模型长×宽×高为 90 m×90 m×30 m,分别为实际工程的 3 倍、3.41 倍、3.24 倍,以消除边界约束对计算结果的影响;边界条件为:①模型的左面($X = -90$)和模型的右面($X = 0$)添加固定 x 方向的位移约束;模型的前面($Y = 0$)和模型的后面($Y = 90$)添加固定 y 方向的位移约束;模型的底面($Z = -30$)添加固定 x,y,z 三个方向的位移约束;模型的顶面($Z = 0$)为自由面不加约束。②在围护桩的底部加固定约束以保证围护桩能够和土体变形的一致

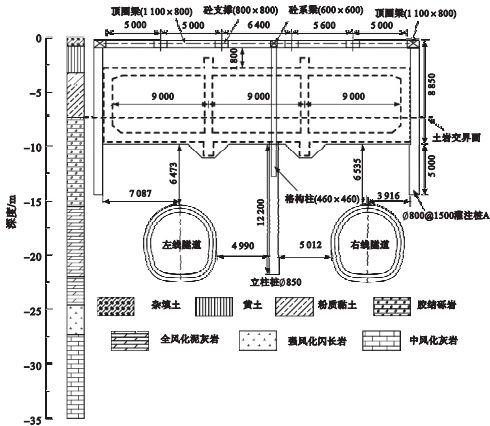


图1 基坑与隧道相对位置剖面图

Fig. 1 The relative position between foundation pit and tunnel

性。③一维的立柱桩与三维的土体结合后两者的自由度存在差异,为保证计算的正确进行要添加竖直方向的旋转约束。土岩交界位置为地表向下 7.3 m,实际工程地下水在双线隧道下方,因此模拟时不考虑地下水的影响。

1.2 模型参数的选取

模型土体的本构采用修正莫尔-库伦模型,土层参数如表 1 所示。实际情况中的地层并不是完全水平的,它们都有一定的倾向,为了建模方便假设地层均为水平,有限元模型如图 2 所示。在实际的地质勘探中,胶结砾岩以上的土层较为复杂,分别是杂填土层、黏土层、粉土层。但是这些土层的性质非常相似,为了建模方便将其合并统一为黏土层,并通过加权平均的方法计算该地层参数。

表1 土体参数

Table 1 The soil parameter

序号	名称	土层	弹性	泊松比	内摩	黏聚力
		厚度/ m	模量/ MPa		擦角/ (°)	
1	黏土	7.3	7	0.32	22	21
2	胶结砾岩	8.3	30	0.28	24	40
3	全风化泥灰岩	9.0	20	0.30	25	36
4	强风化闪长岩	2.7	55	0.25	45	42
5	中风化灰岩	7.7	—	0.22	80	45

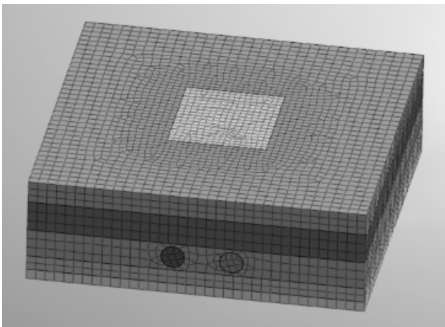


图2 三维有限元模型

Fig. 2 The three-dimensional finite element model

本模型使用的是桩锚支护加内支撑的方案,围护桩是 $\Phi 800@1\ 500$ 的灌注桩,顶部施加冠梁,围护桩和冠梁采用的是一维的梁单元模型。锚杆采用一维的植入式桁架单元;内支撑、立柱桩采用的是一维的梁单元模型;隧道衬砌采用的是二维的板单元模型。

2 模拟结果分析

根据实际工程设计方案,模型分步开挖工况:①初始应力分析;②隧道开挖;③位移清零;④围护桩,冠梁,立柱桩施工;⑤开挖至 -3 m ,在 0 m 处设内支撑, -0.5 m 处设锚杆;⑥开挖至 -6.25 m ,在 -5.75 m 处设锚杆;⑦开挖到底至 -9.25 m 。

图3(a)为隧道在不同工况下的竖向位移情况。两线隧道随基坑开挖深度增加,其上浮量也随之增大。基坑分别挖深 3 m 、 6.25 m 、 9.25 m (坑底)时,下卧隧道拱顶竖向位移分别增幅 1.09 mm 、 1.99 mm 、 2.98 mm ,相比第一个开挖步,后两个开挖步拱顶竖向位移增幅比分别为 82.5% 和 173.4% 。基坑开挖到底后,隧道上浮达到最

大,隧道上浮范围约为基坑长度的2倍。此外,左线隧道的上浮量明显大于右线隧道,这是因为设计方案中相比右线隧道左线隧道更接近基坑中心位置(左线、右线隧道中心与基坑中心的距离分别为 6.11 m 、 9.28 m),所受开挖影响也就越大。

以图3(a)中基坑开挖到底时左线隧道拱顶上浮量最大值所处位置隧道断面为例,图3(b)给出了该断面隧道拱顶、拱腰和拱底位移量。图中正值表示隧道向外扩展、负值表示隧道向内压缩。随着基坑开挖,下卧隧道拱顶和拱底均向上浮动,拱腰向内压缩,整个隧道呈现“竖鸭蛋”形态,并且随着开挖深度增加各阶段增幅比例逐渐增大。可以注意到随着基坑开挖深度的增加,隧道水平方向上拱腰(左)较拱腰(右)位移量更大,这是因为就左线隧道而言,隧道左侧上方土体大部分位于基坑外部,较隧道右侧上方开挖程度低,因此水平方向上隧道左侧土压力大于隧道右侧土压力,从而出现拱腰(左)位移量明显大于拱腰(右)。图3(c)的收敛变化趋势与图3(b)相对应。

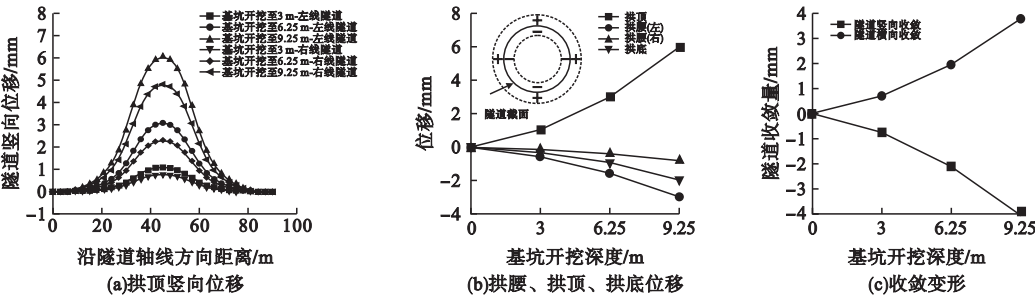


图3 隧道位移和收敛变形

Fig. 3 The displacement and convergence of tunnel

3 土岩组合典型设计参数影响分析

相比其他地层,土岩组合地层中土岩分界面上下岩土强度参数黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和弹性模量 E 、土岩交界面位置、围护桩嵌固深度等变化会对基坑开挖卸荷变形产生直接

影响。为此,笔者着重对这些参数进行深入分析。需要注意的是本节中土层设定为黏土层,岩层设定为胶结砾岩。以下各图中正负号规定和分析断面位置与图3相同。

3.1 土岩分界面上下岩土层强度和刚度
(1) 弹性模量的影响
通过分别改变土岩分界面上下土层和岩

层的弹性模量,分析了土岩相对刚度变化对相同基坑开挖工况下隧道变形的影响规律,具体设置参数如表2所示。其中,根据表1定义土层弹性模量 $E_1=7\text{ MPa}$,岩层弹性模量 $E_2=30\text{ MPa}$ 。

表2 弹性模量组合

Table 2 The combination of elastic modulus					
地层类别	MPa				
	模量1	模量2	模量3	模量4	模量5
土层	E_1	$0.25E_1$	$0.5E_1$	E_1	E_1
岩层	E_2	E_2	E_2	$2E_2$	$4E_2$

不同地层弹性模量组合下隧道变形以及隧道收敛曲线如图4所示。由图可知,以模

量1为参考,模量2与模量3改变土层弹性模量,下卧隧道竖向、横向收敛量无变化,因为土岩分界面在基坑开挖范围内,隧道基本处于岩层中,因岩层弹性模量明显大于土层,本身强度高,卸荷变形小,因此即便是土层弹性模量改变,因岩层弹性模量未发生改变,对岩层中隧道变形影响微弱。而土层弹性模量不变的情况下,一旦改变岩层的弹性模量会直接对隧道的变形产生影响,模量4增加2倍岩层弹性模量,下卧隧道竖向、横向收敛量较模量1分别减少3.9%、9.6%;模量5增加4倍岩层弹性模量,下卧隧道竖向、横向收敛量较模量1分别减少4.0%、9.5%。

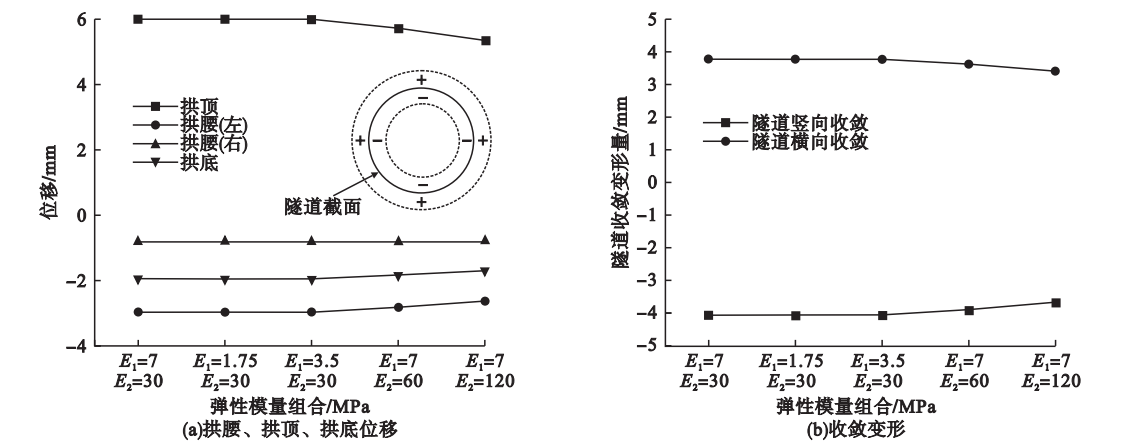


图4 土岩弹性模量与隧道变形关系曲线

Fig. 4 The relationship between soil-rock elastic modulus ratio and tunnel deformation

(2)内摩擦角的影响

通过分别改变土岩分界面上下土层和岩层的内摩擦角,分析了土岩内摩擦角变化对相同基坑开挖工况下隧道变形的影响规律。参数变换分为5组,如表3所示。其中,根据表1定义土层内摩擦角 $\varphi_1=22^\circ$,岩层内摩擦角 $\varphi_2=24^\circ$ 。

表3 内摩擦角组合

Table 3 The combination of internal friction angle					
地层类别	$(^\circ)$				
	内摩擦角1	内摩擦角2	内摩擦角3	内摩擦角4	内摩擦角5
土层	φ_1	$0.5\varphi_1$	$0.75\varphi_1$	φ_1	φ_1
岩层	φ_2	φ_2	φ_2	$2\varphi_2$	$4\varphi_2$

不同地层内摩擦角组合下隧道变形以及隧道收敛曲线如图5所示。由图可知,不论是土层还是岩层内摩擦角改变均对隧道变形影响很小,变化幅度不超过3%。其原因与图4分析相同。

(3)黏聚力的影响

通过分别改变土岩分界面上下土层和岩层的黏聚力,分析了土岩黏聚力变化对相同基坑开挖工况下隧道变形的影响规律。参数变换分为5组,如表4所示。其中,根据表1定义土层黏聚力 $c_1=21\text{ kPa}$,岩层黏聚力 $c_2=40\text{ kPa}$ 。

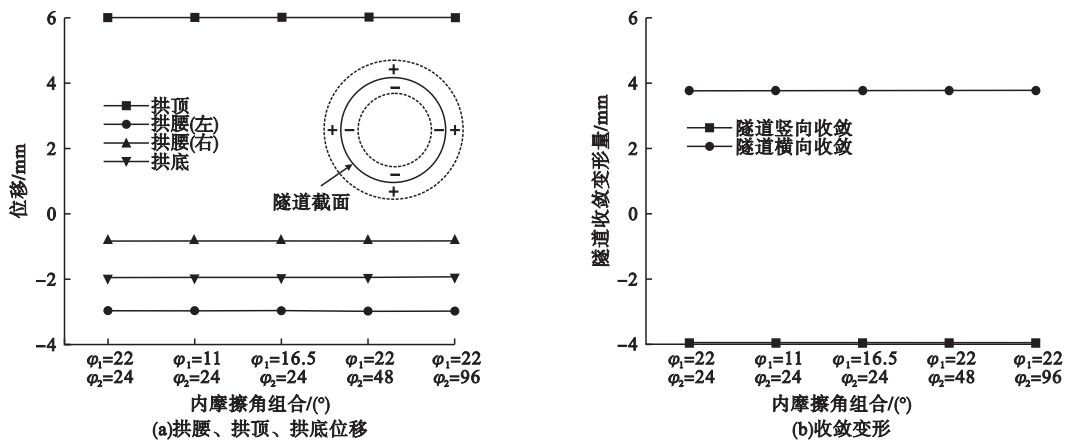


图5 土岩内摩擦角与隧道变形关系曲线

Fig. 5 The relationship between angular ratio of soil-rock friction and tunnel deformation

表4 黏聚力组合

Table 4 The combination of cohesive kPa					
地层类别	黏聚力1	黏聚力2	黏聚力3	黏聚力4	黏聚力5
土层	c_1	$0.25c_1$	$0.5c_1$	c_1	c_1
岩层	c_2	c_2	c_2	$2c_2$	$4c_2$

不同地层黏聚力组合下隧道变形以及隧道收敛曲线如图6所示。由图可知,改变土

层黏聚力对下卧隧道变形微弱,增加岩层黏聚力隧道变形、收敛均有所减小,但幅度不大,其中相较于黏聚力1,黏聚力4增加2倍岩层黏聚力,下卧隧道竖向、横向收敛分别减小2.5%、2.4%;黏聚力5增加4倍岩层黏聚力,下卧隧道竖向、横向收敛分别减小5.7%、5.8%。

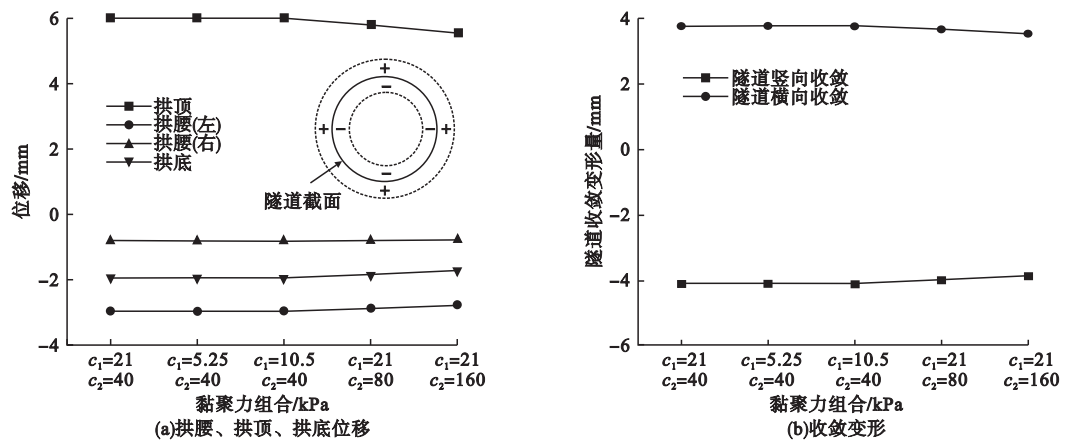


图6 土岩黏聚力与隧道变形关系曲线

Fig. 6 The relationship between soil-rock cohesion ratio and tunnel deformation

3.2 土岩交界面位置

通过分别改变土岩分界面位置,分析了土岩分界面变化对相同基坑开挖工况下隧道变形的影响规律。4种工况土岩分界面分别处于地表向下7.5 m(原土岩分界面位置)、

坑底(开挖深度9.25 m)以上1 m、坑底(开挖深度9.25 m)以下1 m、隧道中轴线,如图7所示。不同土岩交界面位置隧道变形以及隧道收敛曲线如图8所示。

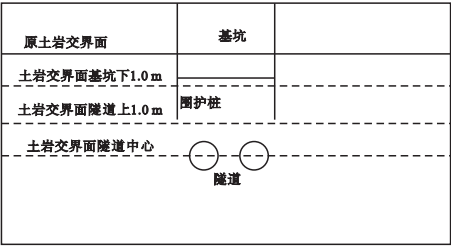


图7 土岩交界面位置示意图

Fig. 7 The schematic diagram of soil-rock interface position

由图8所知,相比于土岩地层强度与刚度参数变化的影响,土岩分界面位置变化的影响更强些。随着土岩分界面的不断下移,隧道拱顶、拱底和拱腰的位移量是逐渐增加的,并且土岩分界面位置越接近隧道影响越为显著。原因为土层较岩层弹性模量小,基坑开挖对土层产生的变形大,随着土岩交界面位置的逐渐下移,土层厚度逐渐增大,进而基坑开挖卸荷导致的下卧隧道变形逐渐增大。

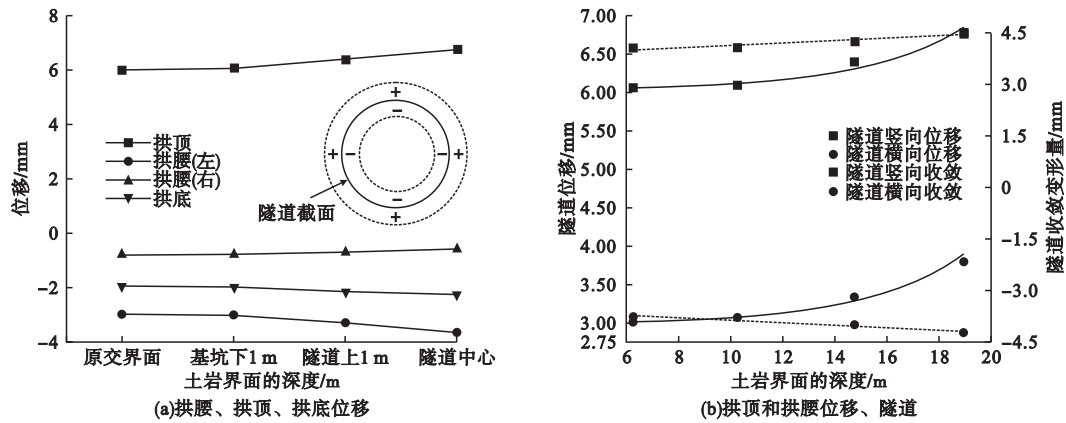


图8 土岩交界面位置与隧道变形关系曲线

Fig. 8 The relationship between the position of soil-rock interface and tunnel deformation

与第一个工况(原土岩交界面位置)相比,后三种工况下隧道拱顶上浮量依此增幅0.04 mm、0.3 mm、0.36 mm,增幅比例分别为1%、6.5%、12.5%。特别注意的是当土岩交界面位于隧道中轴线时,此时处于岩层中的隧道部分相对土层厚度已经很小,可近似认为基坑同隧道一并处于土层之中。因此较单一土层而言,土岩组合地层隧道上浮变形减小约12.5%,而隧道收敛变形量则随着土岩分界面下移,呈线性增长。

3.3 围护桩嵌固深度

在原有设计方案基础上,通过调整围护桩嵌固深度,分析围护桩嵌固深度变化对隧道变形的影响规律。围护桩嵌固深度分别增加0.5 m、减小0.5 m和1.0 m。由图9(a)可注意到:①隧道拱腰(左)、(右)位移量在围护桩嵌固深度逐渐减小的过程中均呈现出

先增大后减小的规律,其原因为当围护桩桩长增加0.5 m时,围护桩距离隧道的距离较近(水平方向距离道隧道最近只有3.8 m,竖直方向距离隧道只有1 m),在基坑围护桩施工时,挤压土体产生附加应力,当两者之间的距离不足以消散产生的附加应力,附加应力就会超过基坑卸载产生的影响占主要地位,进而使隧道拱腰(左)位移量增加、拱腰(右)位移量减小;②围护桩嵌固深度从“不变”到“减小1.0 m”的过程中,水平方向上左侧土压力逐渐增加,因此隧道拱腰(左)位移量逐渐增加,拱腰(右)位移量逐渐减小,此外随着桩端缩短,围护桩桩端越发接近拱腰(右),基坑开挖对桩端附加应力的改变影响了拱腰(右)的应力场,这也是造成了拱腰(右)位移量逐渐减小的原因之一,但这种变化是非常微小的。由图9(b)可以看出,随着

围护桩嵌固深度的减小,隧道位移量和收敛

变形量逐渐增大,并且增幅逐渐增大。

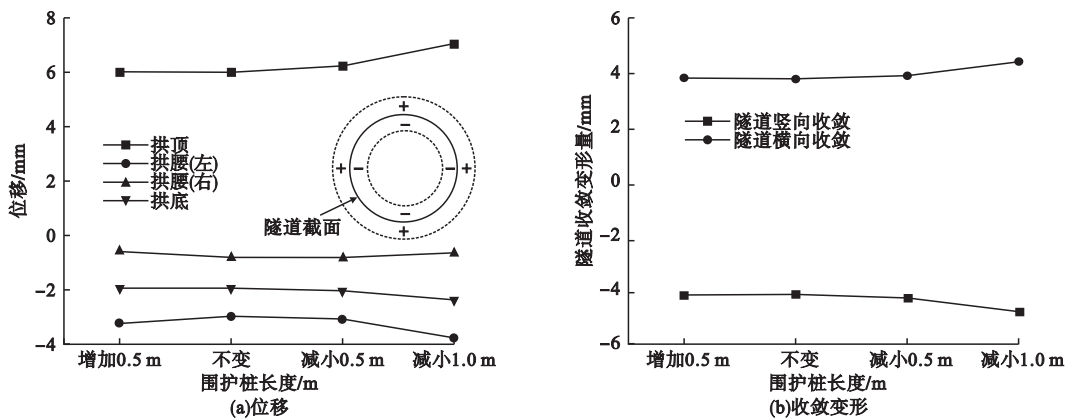


图9 围护桩嵌固深度与隧道变形关系曲线

Fig. 9 The relationship between embedment depth of retaining pile and tunnel deformation

4 结 论

(1) 基坑开挖下卧隧道拱顶和拱底均向上浮动,拱腰向内压缩,整个隧道呈现“竖鸭蛋”形态,并且随着开挖深度增加各阶段增幅比例逐渐增大。

(2) 因为土岩组合地层分界面在基坑开挖范围内,改变土层弹性模量、黏聚力对处于岩层的下卧隧道拱顶、拱腰和拱底的位移量,以及收敛变形量影响很小,增加岩层弹性模量、黏聚力使处于岩层的下卧隧道拱顶、拱腰和拱底的位移量,以及收敛变形量逐渐减小。改变土层、岩层内摩擦角,均对处于岩层的下卧隧道拱顶、拱腰和拱底的位移量,以及收敛变形量几乎无影响。

(3) 随着土岩分界面的不断下移,隧道拱顶、拱底和拱腰的位移量呈非线性增长。与第一个工况(原土岩交界面位置)相比,后三种工况下隧道拱顶上浮增幅比例分别为1%、6.5%、12.5%。隧道收敛变形量,则随着土岩分界面下移,呈线性增长。

(4) 随着围护桩嵌固深度的减小,下卧隧道拱腰(左)位移量先减小后增大;拱腰(右)位移量先增大后减小,拱顶、拱底位移量逐渐增大。且当围护桩嵌固深度增加到与隧道位置接近时(本工程中为增加0.5 m),

围护桩施工产生的附加应力会超过基坑卸载产生的影响占主要地位。

参考文献

[1] 刘建文,施成华,雷明锋,等. 基坑开挖对下卧地铁隧道影响的解析计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2215-2225.
(LIU Jianwen, SHI Chenghua, LEI Mingfeng, et al. Analytical method for influence analysis of foundation pit excavation on underlying metro tunnel [J]. Journal of central south university (science and technology), 2019, 50(9): 2215-2225.)

[2] 魏纲,张鑫海. 基坑开挖引起下卧盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2273-2284.
(WEI Gang, ZHANG Xinhai. Calculation of rotation and shearing dislocation deformation of underlying shield tunnels due to foundation pit excavation [J]. Journal of central south university (science and technology), 2019, 50(9): 2273-2284.)

[3] 欧雪峰,张学民,刘学勤,等. 基坑开挖与降水引起下卧隧道变形的解析计算方法[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 147-154.
(OU Xuefeng, ZHANG Xuemin, LIU Xueqin, et al. Analytic calculation method of underlying tunnel deformation caused by excavation and dewatering of upper pit [J]. Journal of the China railway society, 2019, 41(3): 147-154.)

[4] MENG Fanyan, CHEN Renpeng, XIE Shengwei, et al. Excavation-induced arching effect below base level and responses of long-collinear underlying existing tunnel [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2022, 123: 104417.

[5] SHI Jiangwei, ZHANG Xian, CHEN Yonghui,

- et al. Numerical parametric study of countermeasures to alleviate basement excavation effects on an existing tunnel [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2018, 72: 145–153.
- [6] WANG Chengwu, SUN Huasheng, ZHANG Jihua, et al. Influence of foundation pit excavation on tunnels at different locations [J]. Shock and vibration, 2022, 2022 (4282253): 1–12.
- [7] 陈仁朋, ASHRAF A, 孟凡衍. 基坑开挖对旁侧隧道影响及隔断墙作用离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (增刊 2): 6–11.
(CHEN Renpeng, ASHRAF A, MENG Fanyan. Three-dimensional centrifuge modeling of influence of nearby excavations on existing tunnels and effects of cut-off walls [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2018, 40 (S2): 6–11.)
- [8] 张浩, 范建军, 黄醒春. 开挖方式对下卧隧道变形影响的模型试验研究 [J]. 中外公路, 2020, 40(4): 202–209.
(ZHANG Hao, FAN Jianjun, HUANG Xingchun. Model test study on influence of excavation method on deformation of underlying tunnel [J]. Journal of China & foreign highway, 2020, 40(4): 202–209.)
- [9] 杨波, 谭勇. 土石混合体地层中基坑开挖对邻近既有隧道影响模型试验研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2019, 39(增刊 2): 192–199.
(YANG Bo, TAN Yong. Model test study on the influence of excavation of foundation pit on adjacent existing tunnel in soil rock mixture stratum [J]. Tunnel construction, 2019, 39 (S2): 192–199.)
- [10] 陈仁朋, 刘书伦, 孟凡衍, 等. 软黏土地层基坑开挖对旁侧隧道影响离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (6): 1132–1138.
(CHEN Renpeng, LIU Shulun, MENG Fanyan, et al. Centrifuge modeling of excavation effects on a nearby tunnel in soft clay [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2020, 42 (6): 1132–1138.)
- [11] 郭海峰, 姚爱军, 张剑涛, 等. 建筑施工荷载引起邻近地铁隧道变形机理研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊 1): 341–353.
(GUO Haifeng, YAO Aijun, ZHANG Jiantao, et al. Study on the influence of construction loading on the deformation of adjacent subway tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2019, 15 (S1): 341–353.)
- [12] 林杭, 陈靖宇, 郭春, 等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形影响范围的数值分析 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46(11): 4240–4247.
(LIN Hang, CHEN Jingyu, GUO Chun, et al. Numerical analysis on influence of foundation pit excavation on deformation of adjacent existing tunnel [J]. Journal of central south university (science and technology), 2015, 46(11): 4240–4247.)
- [13] 金雪峰. 某紧邻地铁车站土岩基坑设计与变形规律研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17 (3): 815–824.
(JIN Xuefeng. Study on design and deformation law of soil-rock composite foundation pit close to metro station [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17 (3): 815–824.)
- [14] 鲍晓健. 土岩二元地层复杂工况下深基坑变形性状研究 [D]. 泉州: 华侨大学, 2019.
(BAO Xiaojian. Deformation behavior of deep excavation in soil-rock composite stratum under complicated conditions [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019.)
- [15] 王定军, 王婉婷, 段罗, 等. 基坑开挖对下卧地铁隧道的施工影响分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊 1): 223–232.
(WANG Dingjun, WANG Wanting, DUAN Luo, et al. Construction influence of pit excavation on underlying subway tunnel [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2017, 13(S1): 223–232.)
- [16] ZHANG Hongbing, CHEN Jinjian, FAN Fan, et al. Deformation monitoring and performance analysis on the shield tunnel influenced by adjacent deep excavations [J]. Journal of aerospace engineering, 2017, 30 (2): B4015002. 1–B4015002. 11.
- [17] CHEN Renpeng, MENG Fanyan, LI Zhongchao, et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils [J]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2016, 58: 224–235.
- [18] 郭院成, 李承霖, 靳军伟, 等. 基坑开挖引起的下卧隧道隆起变形及计算深度研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2019, 35 (5): 875–884.
(GUO Yuancheng, LI Chenglin, JIN Junwei, et al. Research on subway tunnel heave induced by foundation pit excavation and determination of calculation depth [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35 (5): 875–884.)
- [19] 薛彦琪, 张可能, 胡晓军. 深基坑开挖卸荷对下卧既有地铁隧道的影响分析 [J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1230–1239.
(XUE Yanqi, ZHANG Keneng, HU Xiaojun. Analysis of the effect of deep foundation pit excavation underlying metro tunnels [J]. Journal of engineering geology, 2016, 24(6): 1230–1239.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)