

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20211227001

文章编号:1674-599X(2023)03-0052-08

引用格式:许杰,郑卫琴,刘洋,等.土层对土岩二元地层深基坑变形影响效应研究[J].交通科学与工程,2023,39(3):52-59.

Citation: XU Jie, ZHENG Weiqin, LIU Yang, et al. Effect of soil layer on deformation of deep foundation pit in soil rock dual layer[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(3): 52-59.

土层对土岩二元地层深基坑变形影响效应研究

许杰¹, 郑卫琴¹, 刘洋¹, 徐嘉祥², 武科²

(1. 山东省第七地质矿产勘查院, 山东 临沂 276000; 2. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要:为探究土岩二元地层中土层力学参数及其空间分布特征对深基坑施工变形规律的影响,采用ABAQUS有限元软件,建立土岩二元地层深基坑三维施工力学模型,考虑土层力学参数及土岩结合面倾斜角等因素,分析多种工况的土岩二元地层深基坑施工诱发变形的规律。研究表明:①土体的弹性模量越大,桩身的侧移就越小,桩身侧移曲线由单调递减变为先增后减的“鱼腹状”,最大侧移点也由桩顶不断下移;②土体的黏聚力越大,土体和桩体的侧移就越小;黏聚力在一定的安全范围内对土体的侧移影响较小;③土岩结合面结构对支护结构变形有重要影响,其倾斜角度可以改变桩侧所受到的侧向土压力。当土岩结合面斜向抗滑桩身一侧时,侧向土压力会增大,导致桩身位移和土体侧移加大,但土岩结合面对岩层及岩层部位的桩体影响不大。

关键词:土岩二元地层;基坑开挖;侧向位移;土岩结合面;数值模拟

中图分类号:TU375

文献标志码:A

Effect of soil layer on deformation of deep foundation pit in soil rock dual layer

XU Jie¹, ZHENG Weiqin¹, LIU Yang¹, XU Jiexiang², WU Ke²

(1. The 7th Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, Linyi 276000, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To explore the effect of soil mechanical parameters and their spatial distribution characteristics on the construction deformation behavior of deep excavation construction, a three-dimensional construction mechanics model of a dual-phase soil-rock stratum deep excavation was established using ABAQUS finite element software. Various construction scenarios were analyzed to compare and study the induced deformation patterns in the dual-phase soil-rock stratum. The study considered factors such as soil stratum mechanical parameters and the inclination angle of the soil-rock interface. The research findings indicate the following: (1) As the elastic modulus of the soil increases, the lateral displacement of the pile decreases. The lateral displacement curve changes from a monotonically decreasing distribution to a "fish belly" distribution with an initial increase followed by a decrease. The maximum lateral displacement point also moves downward from the pile top. (2) As the cohesive strength of the soil increases, the lateral displacement of both the soil and the pile decreases. Within a certain safe range, the cohesive strength has a relatively small influence on soil displacement. (3) The inclination angle of the soil-rock interface significantly affects the deformation of the support structure. It can alter the lateral soil pressure exerted on the pile. When the soil-rock interface is inclined towards one side of the anti-sliding pile, it increases the lateral soil pressure, resulting in greater pile and soil displacement. The impact of the soil-rock interface on the pile within the rock layer or its vicinity is relatively small.

Key words: soil rock composite stratum; foundation pit excavation; lateral displacement; soil rock interface; numerical simulation

收稿日期:2021-12-27

作者简介:许杰(1976—),男,山东省第七地质矿产勘查院研究员。

在土岩二元地层深基坑施工的过程中,支护结构的工作机理及岩土体的相互作用较复杂,且缺乏准确的理论计算依据,特别是针对在土岩组合地层中不同土体参数和不同土岩介质空间分布对基坑变形规律的研究少见。一些学者针对土岩复合地层深基坑变形规律进行了研究。谢锡荣等^[1]研究发现:基坑最大水平位移平均值为基坑开挖深度 H 的0.023%,最大水平位移出现的深度为 $0.59H$,基坑影响范围约为 $1.5H$ 。李克先等^[2]研究了在上软下硬地层中开挖基坑对土体受力及变形分布规律、基坑围护结构变形规律及受力机理,发现:桩体位移峰值的位置随开挖过程的进行不断下移,且围护桩的桩体变形随着开挖深度的增加,由向坑内前倾逐渐变为“)”形曲线。林之航^[3]研究发现,当开挖基坑浅层土体时,对工程基坑围护结构及周边环境的影响较小;当开挖基坑中部淤泥软土层时,工程则会引起基坑围护结构产生较大的侧移,其变形量约占最大侧移量的33%~60%。相较于常规软土基坑,上软下硬的深基坑的最大侧移出现位置更靠上,最大侧移更小,其更接近土质基坑变形的下限值。吴晓刚^[4]采用ABAQUS有限元软件模拟了土岩地层深基坑变形,发现:土岩二元结构地层深基坑具有与土质基坑和岩质基坑不同的特点,随着基坑开挖深度的增加,围护结构的侧移逐渐增大,最终的侧移形态为上部小、中下部大的“花瓶形”。黄敏等^[5]采用数值分析方法对青岛市土岩组合地区桩锚支护体系的“吊脚桩”基坑进行研究,得到结论:强风化岩的基坑的地表沉降影响范围为上覆土层厚度的4倍,仅存在中风化岩或微风化岩基坑中的地表沉降影响范围为上覆土层厚度的2.5倍。WANG等^[6]对软土地区的300个基坑现场实测数据进行归纳分析,提出了围护墙侧移最大值是基坑开挖深度的0.10~0.55%的结论。陈勇^[7]归纳和总结了影响青岛市土岩组合地层基坑变形的主要因素为土层的厚度、基坑开挖深度、围护结构刚度、支撑方式等,并基于主要影响因素,采用BP神经网络预测了土岩组合基坑围护结构侧移范围为7.9~23.2 mm,该值与围护结构侧移实测值范围7.8~25.5 mm相比,相对误差小于10%。祝文化等^[8]采用FLAC^{3D}软件对土岩组合地质条件的某地铁车站围护桩—内支撑基坑进行了数值模拟,发现:基坑上覆土层变形较

大,下伏岩层变形较小。GOLDBERGETAL^[9]通过对63个基坑的现场监测数据进行了研究,发现在软黏土地层中坑外地表沉降最大量为基坑开挖深度的2.5%。在硬黏土、砂砾及砂土地层中基坑外侧地表沉降最大值小于开挖深度的0.5%,基坑围护墙最大变形量与支护方式和地层条件均有关系。HSIEH等^[10]提出了预测基坑围护结构外侧地表为三角形及凹槽形两种沉降模式的方法,并提出主影响区及次影响区的概念。三角形和凹槽形的沉降模式影响范围分为主影响区与次影响区,影响区宽度约为基坑开挖深度的4倍,主影响区范围为基坑开挖深度的2倍,主影响区之外的次影响区也是开挖深度的2倍。PECK^[11]对基坑开挖导致的坑外地面沉降的影响因素进行统计分析,提出了将最大沉降与开挖深度的比值作为基坑沉降预测与控制标准,该标准已被广泛应用。冯虎等^[12]统计了上海市58个深基坑开挖变形监测数据,发现圆形和方形基坑的平均最大侧移分别为基坑开挖深度 H 的0.08%和0.24%。刘全海等^[13]对常州市地铁基坑变形监测数据进行了分析,研究了开挖深度与地面沉降最大值的分布、地面变形模式、支护结构变形特征等,发现:支护结构最大侧移为基坑开挖深度 H 的0.07%~0.27%。这些研究主要针对土岩二元地层基坑开挖后围护结构的侧移变形,但针对不同土层参数及土岩介质空间分布对基坑变形影响的研究较少。因此,本研究拟利用ABAQUS软件,针对多种工况进行计算,对比分析不同土层参数及土岩结合面倾斜角度对基坑围护结构和土体侧移变形的影响规律。

1 数值计算模型与分析方法

1.1 数值计算模型

采用ABAQUS软件,建立基坑开挖的三维有限元模型,模型的计算区域和边界条件的设定以不影响数值计算结果准确性为原则,在三维有限元模型中,基坑长度为40.0 m,宽度为10.0 m,高度为50.0 m,基坑总开挖深度为20.0 m,其中,土体的深度为15.0 m,土体以下为岩层。基坑开挖采用的围护结构为桩锚支护结构。其中,抗滑桩的模型长度为18.0 m、直径为0.8 m、桩心距为1.6 m,桩端嵌岩深度

为 3.5 m;冠梁的模型尺寸为:10.0 m × 0.9 m × 0.60 m,冠梁顶部标高为±0.00 m,基坑底部标高为-20.0 m;位于不同开挖深度的锚杆的长度从上到下依次为 25.5、20.0 和 17.0 m,锚杆与水平方向的夹角为 30°,三排锚杆的竖向间距分别为 5.0、5.0 和 4.5 m,其水平间距均为 1.6 m;进入岩层后采用复合土钉墙进行支护,放坡坡率为 1.0:0.7,岩肩宽度为 3.0 m,两排土钉的长度分别为 10.0 和 8.0 m。土体的三维计算模型网格划分如图 1 所示,基坑支护结构三维模型网格划分如图 2 所示。

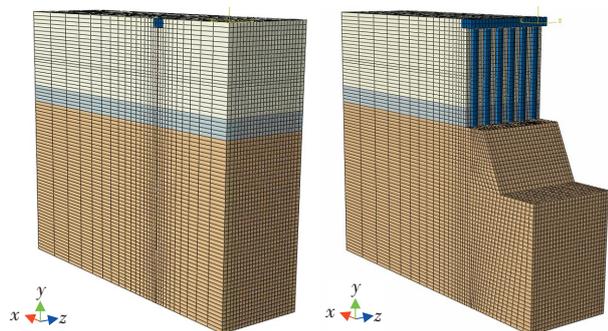


图1 土体三维计算模型

图2 支护结构三维模型

Fig. 1 3D calculation model of soil mass

Fig. 2 3D model of support structure

1.2 数值计算力学参数

本研究岩土体的本构关系均采用 Mohr-Coulomb 模型,并假设同一岩土层水平向均匀分布、各向同性,土体为正常固结,忽略地下水的作用,桩体和锚杆采用弹性模型。岩土体和围护结构在 ABAQUS 中采用 C3D8R 的八结点线性六面体单元,设置减缩积分和沙漏控制。模型计算参数的选取主要依据设计单位提供的设计书及经验取值。各项物理力学参数见表 1。

表1 模型各部分力学参数

Table 1 Mechanical parameters of each part of the model

地层	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚力/ MPa	摩擦 角/(°)	锚杆预 应力/kN
土层	1 920	10	0.30	0.029 6	12.6	—
岩层	2 400	2 000	0.18	0.200 0	45.0	—
抗滑桩 和冠梁	2 500	30 000	0.20	—	—	—
锚杆	—	195 000	0.25	—	—	250

1.3 数值计算与分析方法

假定桩锚支护结构变形满足平面应变的基本条件,桩顶与冠梁的连接为刚性节点。假定土体为弹塑性材料,选用摩尔库伦屈服准则模拟其塑性特性时屈服条件。在 ABAQUS 软件的 part 模块中建立土体、抗滑桩、锚杆、冠梁、喷射混凝土等模型。在 property 模块中,将各个材料参数赋予至各个部件,将各个部件在 assembly 模块中进行装配,组合整体三维模型,基坑开挖过程采用 6 步开挖,开挖一层设置一层锚杆,在对开挖过程进行有限元软件模型建立时,假设:

1) 荷载的确定。

在对模型进行计算之前,先对土体进行初始地应力平衡,在 ABAQUS 软件中有多种平衡初始应力的方法,本模型采用的是在初始分析步后设置地应力步来平衡初始地应力。在计算过程中荷载考虑地表附加荷载、土层压力,忽略水压力的影响。在实际基坑设计中,考虑了基坑顶部荷载,因此在模型顶部施加了大小为 0.03 MPa 的荷载。

2) 分析步的设置。

在 step 模块中建立两类分析步:① 平衡地应力;② 采用静力通用分析步以计算基坑开挖及锚杆的施加等施工过程,共设置 13 个分析步,第 1 个分析步为 geo 分析步,用于进行地应力平衡,第 2 到 13 个分析步均为静力通用分析步,依次为施加抗滑桩、开挖第一层、施加第一排锚杆、开挖第二层、施加第二排锚杆、开挖第三层、施加第三排锚杆、开挖第四层、施加第一排土钉、开挖第五层、施加第二排土钉、开挖第六层。

3) 边界条件的设置。

设定土体底面 x 、 y 、 z 轴这 3 个方向位移均为 0,土体左右两个侧面 x 轴方向位移均为 0,前后两个侧面 z 轴方向位移也均为 0。

4) 相互作用设置。

在 interaction 模块中设置每个部件之间的相互作用和约束,共设置 5 种类型的接触形式:① 将抗滑桩顶面与冠梁的底板采用 tie 形式约束条件进行绑定,约束两者的位移;② 设定抗滑桩表面同土体内部表面的摩擦相互作用力切向行为和法向行为,切向行为的摩擦因数取 0.5,法向行为选取硬接触的方式,土体采用有限滑移的接触形式;③ 将锚杆的上部端点与桩身对应位置处的网格进行耦合约束,

自由度设为6;④将锚杆和土体之间采用 embedded region 进行约束,使锚杆在土体中可以共同受力以及共同变形;⑤设置切向行为以及黏性行为的方式,切向行为中的摩擦因数为0.5,黏性行为设置了3个方向的刚度和损伤系数。在受力过程中,黏性行为先发挥作用,当黏性行为对土体产生破坏后,切向行为再发挥作用。

1.4 工况设置与计算参数

在土岩复合地层中,桩体一般都要嵌固在岩层中,但抗滑桩大部分位于土层中,直接受到土体的作用。因此,土层的力学性能对支护结构的变形的影响较大。本研究岩土体的本构关系均采用 Mohr-Coulomb 模型,主要参数为岩土体的弹性模量、黏聚力,见表2。在表2中,设置了7种工况,探究土层的力学参数对桩身位移大小及分布趋势的影响。

表2 不同土层力学参数工况设置

Table 2 working condition setting of mechanical parameters of different soil layers

工况	弹性模量/MPa	黏聚力/MPa	摩擦角/(°)
一	10	0.029 6	12.6
二	20	0.029 6	12.6
三	50	0.029 6	12.6
四	100	0.029 6	12.6
五	10	0.024 6	12.6
六	10	0.019 6	12.6
七	10	0.014 6	12.6

在土岩复合地层中,一般假定土岩结合面为水平方向,但在实际工程地质环境中,土岩结合面往往不规则或者以一定的倾斜角度存在,这不仅会造成土岩介质空间分布的变化,还会对基坑的变形产生重要的影响。为了研究土岩结合面倾斜角度的影响,在对吊脚桩进行有限元模型计算时,假设以水平方向土岩结合面倾斜角为0°,逆时针方向为正方向,分析吊脚桩在土岩结合面倾斜角度分别为0°、5°、-5°、10°和-10°及不规则角度6种工况的桩体的水平位移及土体的侧向位移的变化。

桩身水平位移云图和土体位移云图,如图3~4所示。从图3~4中可以看出,桩锚支护结构中土体和桩身的水平位移的大小和分布规律存在一定差异。从图3还可以看出,桩体的最大水平位移在桩

顶位置处,最大值为33.5 mm。桩身水平位移随着深度的增加不断减小。在土体位置,部分位移下降较快;而在桩体嵌入岩体位置,部分位移下降幅度较小,甚至接近于0。从图4还可以看出,土体的最大水平位移为29.5 mm,位于土体的中上部,随着深度的增加,土体水平位移先增大后减小。位于开挖底部的岩体的水平位移较小。桩身和土体间的水平位移差异主要由于两者受力形式的不同而产生,土体受到的是土体开挖卸荷之后产生的内力,而桩身则直接承受开挖卸载产生的侧向土压力,土体在内力的作用下趋于剪切破坏。因此,最大位移位于土体中部,而桩体一侧嵌入岩层,相当于一端固定的悬臂梁,在受到侧向土压力之后,在弯矩作用下最大桩身位移位于桩顶位置处。

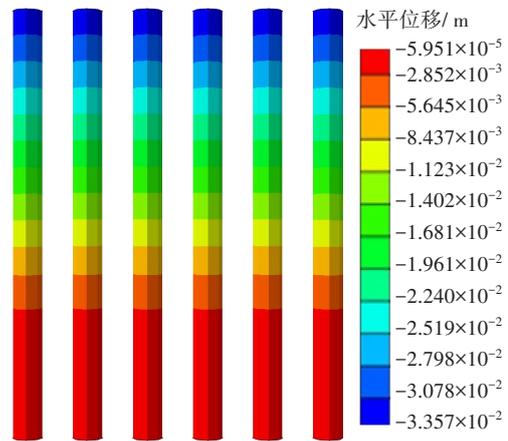


图3 桩身水平位移云图

Fig. 3 Nephogram of horizontal displacement of pile body

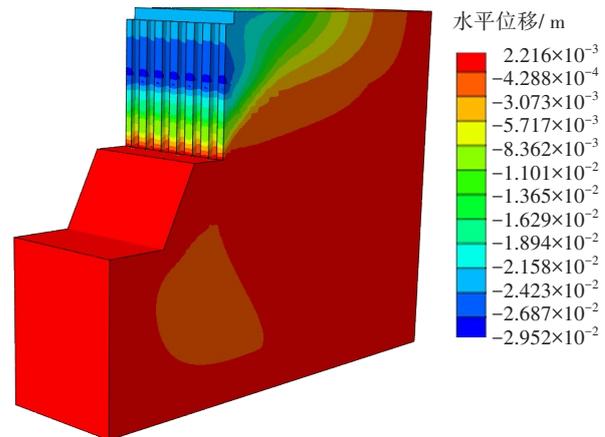


图4 土体位移云图

Fig. 4 Nephogram of soil displacement

从图4还可以看出,土体距离坑边的最大地表位移为12.0 mm,位于距坑边0.0 m处。随着距基坑边的距离不断增加,位移呈二次抛物线式缓慢减小,距基坑边10 m位置的地表位移为0。将类似工

程在基坑开挖过程中的实际监测值与该数值计算值进行对比,见表3。由表3可知,数值计算结果同实际测量值在靠近围护结构的范围内相差不大,数值计算值比实测值略小,两者相差约10%,满足工程要求,且两者的变化趋势相同,均为离围护结构越远,地表沉降越小,表明:本研究数值模拟分析的结果是准确的和可靠的。

表3 实测值与计算值对比

Table 3 Comparison between measured and calculated values

距围护结构 距离/m	地表位移/mm	
	计算值	实测值
1	12.0	13.0
5	9.3	10.7
10	2.1	5.4

2 计算结果与分析

2.1 土层力学参数敏感性分析

图5~6分别为不同土体弹性模量时数值模拟计算的土体水平位移曲线图和桩身水平位移曲线图。从图5~6可以看出,两种曲线图差异明显。从图5还可以看出,当弹性模量为10 MPa时,土体的最大水平位移为29.0 mm,分别为弹性模量20、50和100 MPa时的1.8倍、3.3倍和4.8倍。这表明:土体的弹性模量是最直接影响土体变形的参数。当土体自重差别不大时,土体的弹性模量越小,土体卸荷产生的侧向土压力导致的土体侧移就越大。随着土体深度的增加,土体水平位移先增加后减小。土体的弹性模量越小,曲线起伏越明显,最大侧移点也会越上移。这是因为土体的弹模越小,土体的稳定性越差,土体越趋向于发生剪切破坏,土体会出现滑移,因此,图5中出现了转折点。从图6可以看出,在不同土体弹性模量下,不仅桩身水平位移大小发生明显变化,其变化趋势也有很大的不同。当弹性模量为10 MPa时,桩身位移曲线呈类似二次曲线的变化趋势,最大桩身水平位移点位于桩顶位置处,随着弹性模量的不断增加,最大桩身水平位移点不断下移,桩身位移曲线也变化为“鱼腹状”。这表明:土体弹性模量的改变会引起桩身位移以及分布趋势的改变。这是因为桩体除了要承受土体的侧向土压力,还要承受来自土体变形产生的内力,因此桩身的最大水平位移同土体的最大水平位移为正相关关系。土体的弹性模量越大,桩身同土体协同变

形的能力越强,桩身位移也越接近土体的变形。这表明土体的弹性模量对土体为直接影响作用,而对桩体为间接影响作用。

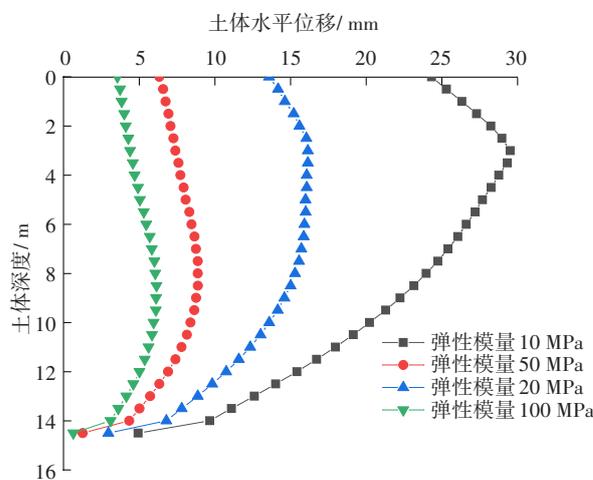


图5 不同土体弹性模量土体水平位移曲线

Fig. 5 horizontal displacement curve of soil with different elastic modulus

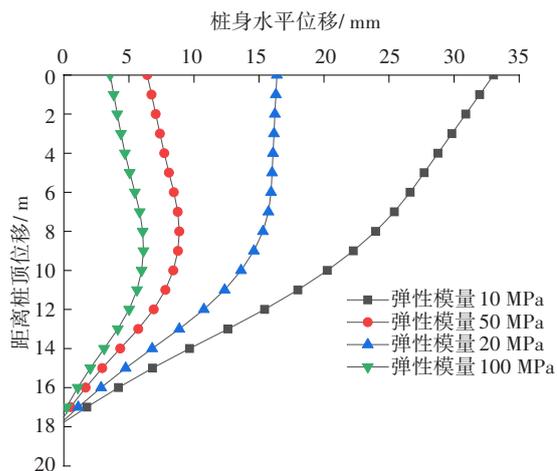


图6 不同土体弹性模量桩身水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal displacement curve of pile shaft with different soil elastic modulus

图7为不同土体黏聚力下桩身水平位移曲线。从图7可以看出,将土体的黏聚力分别为0.029 6、0.024 6、0.019 6和0.014 6 MPa时,桩顶位移分别为33.0、35.0、44.5和63.7 mm。这表明:土体黏聚力的改变会对桩身位移造成显著的影响。黏聚力越大,桩身侧移就越小。黏聚力是分子之间的相互吸引力,可以看作为破坏面在没有任何正应力作用的抗剪强度,对土体的抗剪强度有更加直接的影响。当黏聚力作为单一变量时,黏聚力越大的土体,受荷载能力越好,传递给桩身的土压力就越小,因此,桩身位移就越小。不同摩擦角下土体水平位移曲线如图8所示。从图8可以看出,随着黏聚力的减小,

沿土体深度的土体水平位移均有较为明显的变化,但分布趋势均呈现“勺型”分布。随着黏聚力不断减小,土体愈加趋向于发生剪切破坏,侧移拐点就愈加明显。当土体黏聚力分别为0.029 6和0.024 6 MPa时,土体的最大水平位移分别为29.5和31.6 mm,两者相差不大,且最大位移均发生土体中上部。当黏聚力分别为0.019 6和0.014 6 MPa时,土体的最大水平位移依次为39.4和56.0 mm,土体最大位移仍然发生在土体中上部。这表明:上部土体处于失稳状态,黏聚力的减小对土体水平位移的影响显著。这也表明:土体的黏聚力为保持土体稳定性的关键参数,黏聚力的改变对桩身位移及土体位移均有明显的影响。

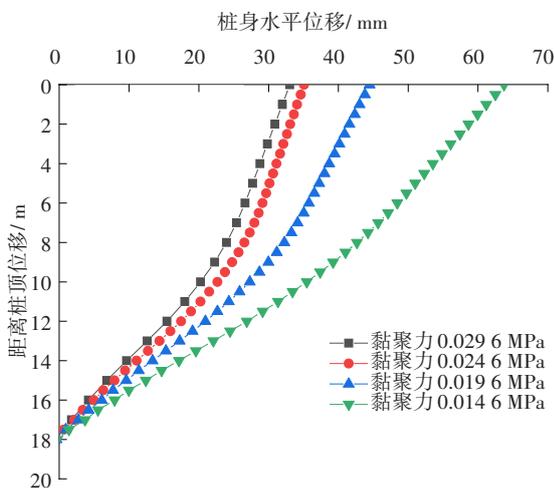


图7 不同土体黏聚力桩身水平位移曲线

Fig. 7 Horizontal displacement curve of pile body with different soil cohesion

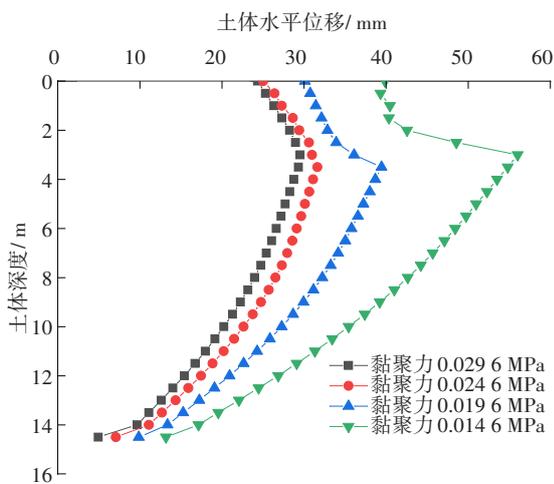


图8 不同土体黏聚力土体水平位移曲线

Fig. 8 Horizontal displacement curve of soil with different cohesion

2.2 土岩结合面倾斜角度差异性分析

不同土岩结合面倾斜角度下吊脚桩的桩身位

移曲线如图9所示。从图9可以看出,6种工况的桩身水平位移曲线的发展趋势相同,均为沿桩身不断减小,但桩顶最大水平位移相差较大,当土岩结合面倾斜角度分别为 -10° 、 -5° 、 0° 、不规则、 5° 、 10° 时,桩顶最大水平位移依次为26.6、28.0、33.0、34.2、35.5和36.7 mm。这表明:随着倾斜角度由负到正不断增加,桩顶最大水平位移也在不断增加。不同土岩结合面的倾斜情况还会导致土体空间分布发生改变。通常在土岩结合面为水平时,桩体承受的侧向土压力是由基坑开挖土体卸荷导致的,但在土岩结合面为倾斜时,土体的自重作用及土层和岩层的摩擦作用会对该侧向土压力产生额外的倾斜土压力。当土岩结合面倾斜角分别为 5° 或 10° 时,上部土体会沿着倾斜面对桩体施加额外的由自重产生的分力,导致桩体承受更大的压力,致使桩身的位移加大。同理,当土岩结合面倾斜分别为 -5° 或 -10° 时,上部土体会沿着倾斜面产生一个与侧向土压力方向相反的力,导致桩体所承受的侧向土压力减小,使桩身的位移减小。这表明:不同土岩结合面的倾斜情况导致上部土体的分布发生改变,影响桩身位移的大小。在靠近岩层的区域内,几条桩身位移曲线接近甚至重合,表明土岩结合面倾斜角度的改变并不会对岩层的受力情况造成影响,由于桩身完全嵌入到岩层中,位于岩层区域内的桩身位移也不会受到影响。

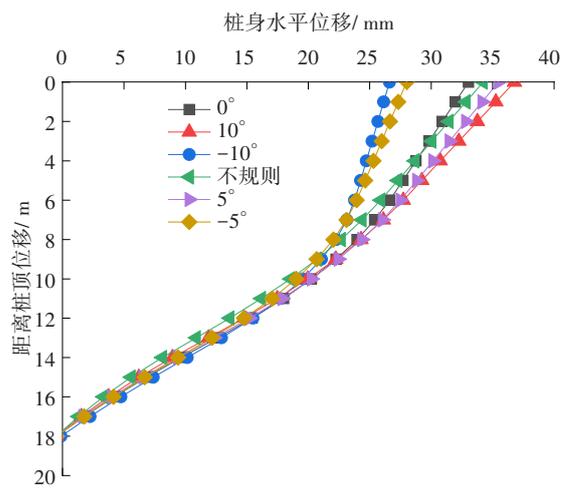


图9 不同土岩结合面倾斜角度桩身水平位移曲线

Fig. 9 Horizontal displacement curve of pile shaft at different inclination angles of soil rock interface

不同土岩倾斜角度下土体水平位移曲线如图10所示。从图10可以看出,随着土岩结合面倾斜角度的改变,土体最大水平位移以及土体顶部水平位移均发生改变,当土岩结合面倾斜角度分别为

-10°、-5°、0°、不规则、5°、10°时,土体最大水平位移依次为 24.4、25.5、29.5、30.1、31.6 和 32.9 mm,土体顶部水平位移依次为 9.4、17.6、24.3、26.4、28.6 和 30.6 mm。当土岩结合面角度不断增大时,土体的最大水平位移和顶部水平位移也在不断增加。其中,土体顶部水平位移增加更为明显。土体水平位移沿土体深度的变化趋势为先增大后减小,当土岩结合面倾斜角从 10° 变到 -10° 时,土体最大水平位移位置逐渐下移。由于土岩结合面倾斜角度的改变会影响土岩介质的空间分布。当土岩结合面倾斜角大于 0° 时,在相同体积的介质下,此时的土层的占比会比 0° 土岩结合面倾斜角的占比要小,但此时的土层所受到的沿水平方向的作用力更大,因此,土体的水平位移更大,此外岩层占比更大,土岩复合地层的抗变形能力和稳定性更强,土体最大水平位移位置也更靠上;当土岩结合面倾斜角小于 0° 时,则反之。土岩结合面倾斜角度的改变对岩层的受力影响不大,这条土体水平位移曲线在岩层位置处接近甚至重合,不同土岩结合面角度下岩体的水平位移相差不大。

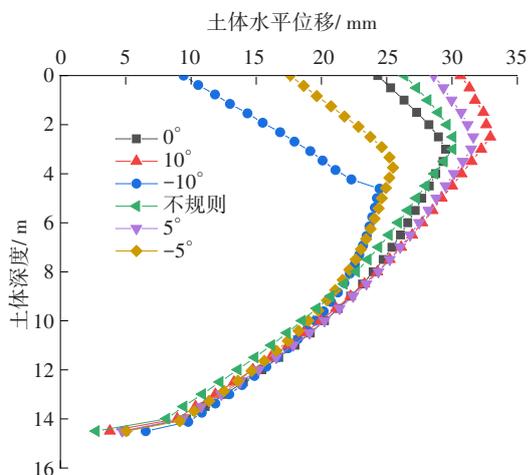


图 10 不同土岩结合面倾斜角度土体水平位移曲线
Fig. 10 Horizontal displacement curve of soil mass at different inclination angles of soil rock interface

3 结论

采用 ABAQUS 软件,建立了土岩二元地层深基坑施工三维数值模型,并将模拟计算结果与实际工程实测值进行对比分析。考虑岩土力学参数差异性、土岩介质空间分布特征等因素,研究了土岩二元地层深基坑围护结构及土层的变形特征,分析了土岩二元地层土体参数及土岩结合面倾斜角度对基坑变形的影响规律,得到结论:

1) 土体的弹性模量会直接影响土层的侧移,进而间接影响桩身的侧移。弹性模量越大,桩身的侧移就越小。桩身侧移的分布趋势也会发生变化,桩身侧移曲线由单调递减分布变为先增后减的“鱼腹状”分布,最大侧移点也由桩顶不断下移。随着弹性模量的增大,土层开挖后的侧移也越小。土体侧移随深度先增加后减小,土体侧移曲线起伏逐渐放缓。对于不同弹性模量的土体,最大桩身侧移产生的位置及所采取的安全措施是不同的。

2) 土体的黏聚力为保持土体稳定性的关键参数,黏聚力的大小与土体的抗剪强度密切相关。黏聚力越大,土体的侧移就越小,桩体侧移也越小,黏聚力在一定的安全范围内对土体的侧移影响较小。在不同的黏聚力时土体的侧移相差不大,但随着黏聚力进一步减小,土体的侧移和桩身位移均呈现几何倍数增加,因此,在工程中需要重点关注土体黏聚力所带来的影响,若黏聚力过小,则需要根据工程实际情况采取相应的安全措施,如增加锚杆预应力或者减小抗滑桩之间的间距。

3) 土岩结合面是影响支护结构变形的重要因素,其倾斜角度可改变桩侧所受的侧向土压力,当土岩结合面斜向抗滑桩一侧时,侧向土压力增大导致桩身位移和土体侧移加大;反之,当土岩结合面斜向抗滑桩相反一侧时,侧向土压力减小,从而使桩身位移和土体侧移减小。但土岩结合面对岩层以及岩层部位的桩体影响不大。因此,在设计围护结构之前,需对土岩地质条件进行充分的勘察,充分考虑未开挖一侧土岩倾斜的影响,尤其是当土岩结合面向抗滑桩一侧倾斜时,需进一步加强围护结构。

参考文献 (References):

- [1] 谢锡荣,王立峰,韦康,等.土岩组合地层地铁深基坑开挖性状分析及预测[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):247-254.
XIE Xirong, WANG Lifeng, WEI Kang, et al. Analysis and prediction of excavation behavior of metro deep foundation pit in soils underlain by rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 247-254.
- [2] 李克先,雷刚,李健,等.土岩组合地层深基坑桩撑体系变形及受力分析[J].科学技术与工程,2021,21(1):310-317.
LI Kexian, LEI Gang, LI Jian, et al. Deformation and force analysis of pile foundation system of deep

- foundation pit in combination of soil and rock [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(1): 310-317.
- [3] 林之航. 上软下硬深基坑变形规律与空间效应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1792-1800.
LIN Zhihang. Research on deformation and spatial effect of upper-soft and lower-hard deep foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1792-1800.
- [4] 吴晓刚. 地铁吊脚桩深基坑围护结构及土体变形规律[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(14): 280-287.
WU Xiaogang. The deformation law of retaining structure and soil of deep foundation pit by suspending pile in metro [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(14): 280-287.
- [5] 黄敏, 刘小丽. 土岩组合地区桩锚支护基坑开挖地表沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 571-575.
HUANG Min, LIU Xiaoli. Ground settlement induced by excavation of pile-anchor retaining foundation pits in soil-rock mixed areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 571-575.
- [6] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985-994.
- [7] 陈勇. 土岩组合地区基坑变形的预测方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(5): 97-101.
CHEN Yong. Study on prediction for excavation deformation in rock-soil combination [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(5): 97-101.
- [8] 祝文化, 刘毅, 夏元友, 等. 土岩基坑开挖变形相关因素与规律[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(5): 106-110.
ZHU Wenhua, LIU Yi, XIA Yuanyou, et al. Relative factors and rules about deformation of foundation pits in strata with rock-soil [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(5): 106-110.
- [9] GOLDBERG D, JAWORSKI W, Gordon. Lateral support systems and underpinning. volume I: design and construction [EB/OL]. (1976-12-16) [2021-12-28]. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/PB257210.xhtml;jsessionid=fd7948dfb86317a87f6d91805510>
- [10] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(6): 1004-1017.
- [11] R.B.Peck. Deep excavation and tunneling in soft ground [EB/OL]. (1969-04-05) [2021-12-27]. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/38/1969_04_0004.pdf.
- [12] 冯虎, 刘国彬, 张伟立. 上海地区超深基坑工程地下连续墙的变形特性[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 151-156.
FENG Hu, LIU Guobin, ZHANG Weili. Deformation properties of diaphragm walls associated with excavation of ultra-deep foundation pits in Shanghai [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 151-156.
- [13] 刘全海, 赵尘衍. 常州地区地铁车站深基坑变形特性分析[J]. 城市勘测, 2019(6): 120-125.
LIU Quanhai, ZHAO Chenyan. Analysis on deformation characteristics of deep foundation pit of metro station in Changzhou area [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(6): 120-125.
- [14] 伊晓东, 黄鹏, 王智超. 土岩二元地区深基坑桩锚支护结构变形分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(S1): 1549-1553, 1558.
YI Xiaodong, HUANG Peng, WANG Zhichao. The deformation analysis of pile-anchor supporting system of deep foundation pit in soil-rock dualistic area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(S1): 1549-1553, 1558.[万方]
- [15] 李淑, 张顶立, 房倩, 等. 北京地铁车站深基坑地表变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 189-198.
LI Shu, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Research on characteristics of ground surface deformation during deep excavation in Beijing subway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 189-198.
- [16] 陈尚荣, 曹传祥, 廖志坚. 不同支护深基坑开挖对地下通道变形的影响[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(4): 43-52.
CHEN Shangrong, CAO Chuanxiang, LIAO Zhijian. The influence of deep excavation on the deformation of surrounding rectangular underground tunnel based on different supporting forms [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 43-52.
- [17] 贺炜, 邓子君, 刘剑锋, 等. PVC板桩支护结构的长期变形特性及设计方法[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(3): 41-46.
HE Wei, DENG Zijun, LIU Jianfeng, et al. Study on long-term deformation characteristics and design method of PVC sheet pile support structure [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 16(3): 41-46.

(责任编辑:欧兆虎;校对:李脉;英文编辑:陈璐)