

某地铁车站深基坑开挖地连墙水平位移分析

赵平¹, 王占棋²

(1. 铜陵学院 建筑工程学院, 安徽 铜陵 244000; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

摘要:现场监测难以预测基坑和围护结构后期变形规律。采用 MIDAS/GTS NX 对某地铁车站深基坑开挖及支护全过程进行数值模拟, 探寻深基坑开挖引起的地连墙水平位移变化规律, 并对比现场监测数据验证数据模拟的可靠性。研究表明: 随着基坑的开挖, 地连墙不同深度下的水平位移变化呈现出内凸的规律, 开挖完成时模拟最大水平位移值约为 11.6 mm, 现场监测最大值约为 13.9 mm, 最大水平位移位于开挖面附近; 改变地连墙厚度及嵌固深度后发现, 地连墙厚度及嵌固深度的增大可减小地连墙深层水平位移, 但对地连墙顶部水平位移影响较小。研究成果可为深基坑开挖对周边环境影响的分析及类似工程施工方案的优化提供参考。

关键词:深基坑开挖; 地连墙; 数值模拟; 变形特性

中图分类号:TD353 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2023)03-0001-08

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2023.03.001

Horizontal Displacement Analysis of Diaphragm Wall in Deep Foundation Pit Excavation of a Subway Station

ZHAO Ping¹, WANG Zhan-qi²

(1. School of Architectural Engineering, Tongling University, Tongling 244000, China;

2. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: It is difficult to predict the later deformation pattern of the foundation pit and envelop enclosure simply by on-site monitoring. In this paper, MIDAS/GTS NX was used to simulate the whole process of foundation pit excavation and support. As a result, the variation rule of horizontal displacement of diaphragm wall caused by deep foundation pit excavation was found, and the rationality of the simulation was verified by comparing the monitoring data. The results show that, with the excavation of the foundation pit, the horizontal displacement of the diaphragm wall at different depths shows an “inner convex” pattern. When the excavation is completed, the simulated maximum horizontal displacement is about 11.6 mm, the maximum value of on-site monitoring is about 13.9 mm, and the maximum horizontal displacement is located near the excavation surface; After changing the thickness and buried depth of the diaphragm wall, it is found that the increase of the thickness and embedded depth of the diaphragm wall can reduce its deep horizontal displacement, but has

基金项目:国家自然科学基金项目(51874112);安徽省省级质量工程教研项目(2020jyxm2007)

作者简介:赵平(1989—),男,安徽宣城人,讲师,硕士,研究方向为岩土工程;

王占棋(1991—),男,安徽亳州人,博士研究生,研究方向为岩土工程。

little effect on the top horizontal displacement. The research results can provide reference for the impact analysis of the deep foundation pit excavation on the surrounding and the optimization construction scheme of similar projects.

Key Words: deep foundation pit excavation; diaphragm wall; numerical simulation; deformation characteristics

0 引言

随着城市建设需求的日益扩大,大型地下空间的开发建设已成为一种发展趋势,但地下空间的开发建设都将面临复杂的深基坑工程问题^[1]。特别是在城市地铁建设中,开挖深基坑势必会对周边建(构)筑物产生不利影响^[2]。深入研究深基坑开挖引起的支护结构和土体变形特性对于基坑工程防灾减灾具有重要意义^[3]。近年来,有不少学者对相关问题开展了多方面研究,并取得一些有益成果^[4-6]。在理论计算方面,魏纲等^[7]推导出基坑开挖下带有抗浮锚杆盾构隧道的隆起变形与环间转角和错台变形量的计算公式;易顺等^[8]开展了基于随机场理论的基坑开挖地表及围护墙变形分析;李俊等^[9]综合考虑复杂岩土工程与既有结构的共同作用,推导出一种基于应力叠加方式的盾构隧道衬砌精细化分析方法。在现场监测方面,朱栋梁等^[10]开展了基于光纤传感技术的桩体位移监测方法研究,结果表明,分布式光纤传感器监测效果优于侧斜管;马少俊等^[11]开展了某深基坑开挖对邻近既有盾构隧道影响的实测分析,结果表明,分区分块的基坑开挖方式利用时空效应,可大大减小基坑开挖卸载过程中隧道的隆起变形;彭丽云等^[12]运用现场监测方法开展了密贴既有线路基的双基坑开挖支护参数优化研究,结果显示,基坑的不断深挖会引起桩身水平位移持续变大。在数值模拟方面,李顺群等^[13]以某深基坑项目为例,利用小变形硬化模型研究了基坑开挖对邻近既有隧道变形的影响,结果表明,基坑开挖引起围护结构向基坑方向的最大偏移量为 25.8 mm;丁士龙等^[14]以杭州市某风井深基坑工程为研究对象,基于小应变土体本构模型建立了基坑开挖三维数值模型,研究了不同距离下浅基础建筑墙体的沉降

以及基础水平位移的变化规律;刘畅等^[15]利用 PLAXIS 有限元软件进行数值建模,对斜桩轴力发挥机理、斜桩倾斜角度等因素对斜直交替桩支护性能的影响展开了研究。

这些研究极大程度地推动了业界对基坑围护结构的认识和发展。目前,对于深基坑开挖引起的支护结构变形影响研究,大部分学者选用摩尔库伦为土体的本构模型,较少有学者采用修正摩尔库伦本构模型,但胡建林等^[16]在进行深基坑变形数值分析时发现,使用修正摩尔库伦本构模型进行基坑开挖方面的研究更具参考价值。此外,现有研究表明,基坑工程具有很强的区域性^[17],数值模拟方法具有动态模拟基坑开挖与支护施工过程的优点,而现场监测可以对施工过程进行实时监控和动态控制,能够有效确保基坑开挖施工过程中基坑周围既有建筑的安全^[18]。本文在上述研究的基础上,以合肥地铁 3 号线某车站深基坑开挖工程为研究对象,基于修正摩尔库伦本构模型,采用 MIDAS/GTS NX 对基坑开挖及支护全过程进行数值模拟,探寻深基坑开挖引起的地连墙水平位移的变化规律,并将模拟结果与现场监测数据进行对比,验证数值模拟的可靠性,然后在此基础上改变地连墙厚度及嵌固深度等设计施工参数,研究由此引起的地连墙水平位移的变化规律,以为后续类似工程设计及更深入的理论研究提供参考。

1 工程概况

合肥地铁 3 号线某车站深基坑采用明挖顺作法进行施工,基坑平面形状为矩形,长度为 504.85 m,宽度为 18 m,开挖深度为 16 m,共分 3 次开挖,依次为:4 m,6 m 及 6 m。基坑的支护结构由地连墙和 3 道内支撑组成:地连墙为钢筋混凝土墙,高度为 24 m,其中嵌入土体深度为 8 m,厚度为 1 000 mm;3 道内支撑均为圆

管型钢支撑,截面尺寸 $D=609\text{ mm}$, $t=16\text{ mm}$, 内支撑布置在地表以下 0.4 m 以及 10 m 处,内支撑水平间距均为 5 m 。此外,地连墙采用 C30 混凝土,弹性模量为 $3\,000\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,泊松比为 0.2 ,重度为 $28\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$;钢支撑弹性模量为 $215\,000\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$,泊松比为 0.3 ,重度为 $78\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2 建模与计算

2.1 MIDAS/GTS NX 软件在深基坑工程中的运用

MIDAS/GTS NX 软件是一种专门用于岩土工程问题中变形和稳定性分析的二维计算程序。张艳书等^[2]采用 MIDAS 商用软件开展了软土层对地铁狭长深基坑地表沉降的影响研究,并将模拟结果与监测数据进行了对比,结果表明,使用该软件建立的有限元数值计算模型可以较为准确地预测围护结构的水平变形特征;麻凤海等^[19]以沈阳市地下综合管廊 5 号盾构始发井深基坑工程为背景,采用 MIDAS/GTS 大型有限元软件建立了深基坑三维地层模型,并对基坑施工的全过程进行了全面、动态的模拟;张振昌等^[20]利用 MIDAS/GTS 软件对隧道区间典型截面开挖、支护及浇筑等全过程进行了有限元模拟分析,并将分析结果与现场沉降监测数据进行了对比,结果显示,该有限元分析能较准确反映实际沉降规律,可用于施工沉降控制。综上所述,MIDAS/GTS 软件在深基坑工程中运用广泛,并取得了较好的模拟效果。因此,本文选用 MIDAS/GTS NX 软件进行数值模拟。

2.2 基本假定

由于施工过程和现场工程条件比较复杂,为了便于计算,在数值模型设计时有必要对实际条件进行一定简化^[17],因此本文的基本假定如下:对基坑中部的标准段进行模拟,按照二维平面问题进行操作^[21-22];各层土体连续且均匀分布;不考虑地下水对围护结构变形的影响;地连墙和内支撑均为弹性体;同一种材料为均质且各向同性。

2.3 建立模型

选取基坑的一个典型断面(见图 1)作为计算断面,使用有限元计算软件 MIDAS/GTS NX 建立基坑二维模型。根据圣维南原理,并考虑工程实际情况,本文建立的整体二维模型宽(x)、高(y)分别为 118 m , 60 m ,远大于预计基坑开挖影响范围。模型坐标系为 X 轴正方向指向基坑宽, Y 轴正方向铅直向上。模型采用标准边界条件,左右边界仅允许发生竖向位移,顶部为自由边界,允许发生横向和竖向位移,底部为固定约束。此外,地连墙与土体在强度和刚度上存在较大差异,在外力作用下其界面有可能产生相对滑移或脱离^[23]。因此,为了更好地进行数值模拟,在地连墙与土体之间设置接触面单元。本文研究采用软件自带的库伦摩擦界面单元体现地连墙与土体之间接触面的特性,当二者的表面发生接触时,在接触面之间传递切向力和法向力。结合相关工程经验,模型中法向刚度模量和剪切刚度模量取值分别为 $800\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $8\,000\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,且不考虑非线性接触^[24]。由于基坑周围土体的变形响应具有明显的小应变特性,数值模型中土体采用修正摩尔库伦本构关系。数值模型土层力学参数如表 1 所示。模型中为考虑土体平面应变的 2D 面单元,地连墙、基坑内支撑均采用 1D 梁单元。为保证数值计算结果的可靠性和准确性,在参考文献^[25]的基础上,经过计算分析验证,最终确定本研究网格单元尺寸均为 1 m ,整体二维模型网格划分情况如图 2 所示。数值模型共计 $7\,359$ 个单元、 $7\,328$ 个节点。

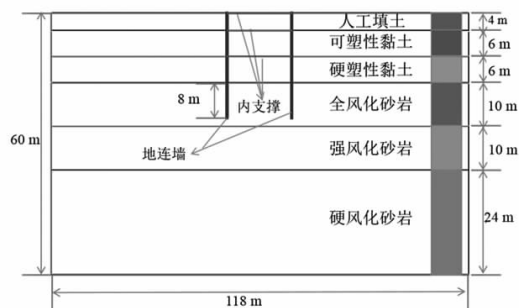


图 1 典型断面示意图

表 1 数值模型土层力学参数

土层名称	E_{50ref} $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	E_{oedref} $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	E_{urref} $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	ν	γ $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	$\varphi/^\circ$
人工填土	3 100	3 100	9 300	0.38	19.9	5	7
可塑性黏土	5 000	5 000	15 000	0.33	19.8	40	14.2
硬塑性黏土	13 000	13 000	39 000	0.3	20.1	40	15.2
全风化砂岩	15 000	15 000	45 000	0.3	20.3	35	15.7
强风化砂岩	60 000	60 000	180 000	0.2	23.1	91	24
硬风化砂岩	93 000	93 000	279 000	0.2	25.3	310	30

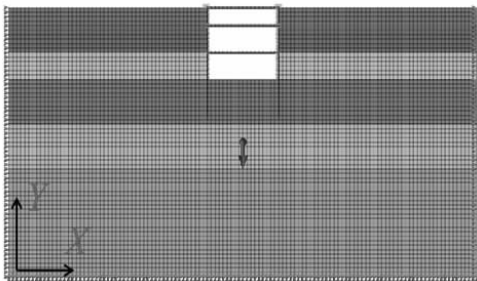


图 2 二维有限元模型

2.4 模拟施工

数值模拟中基坑的开挖和支护分别通过软件中的命令钝化和激活来控制,数值模拟的基坑开挖过程与现场的基坑开挖过程保持一致,具体施工工况为:工况 1,进行初始地应力分析,位移清零;工况 2,地连墙施工;工况 3,基坑开挖至地表以下 4 m,施作第一道支撑;工况 4,基坑开挖至地表以下 10 m,施作第二道支撑;工况 5,基坑开挖至地表以下 16 m,施作第三道支撑。

3 数值模拟结果与现场实测对比分析

图 3 为基坑开挖完成时地连墙水平位移模拟值与现场监测值对比图。通过观察对比可以发现,现场监测变形值与模拟值较为接近,且变化趋势大致相同,由此证明该数值模型精度符合要求,同时也说明此次基坑开挖设计及施工相对合理。具体来看,地连墙水平位移数值模拟的最大值约为 11.6 mm,现场监测的最大值约为 13.9 mm,均小于报警值 20 mm,且均发生在开挖面附近位置。此外,实测数据略大于模拟计算结果,这主要是由于建模时采取了许多简化假定,而实际基坑开挖支护是一个十分复杂的过程,不可避免地受到周边其他因素的影响。

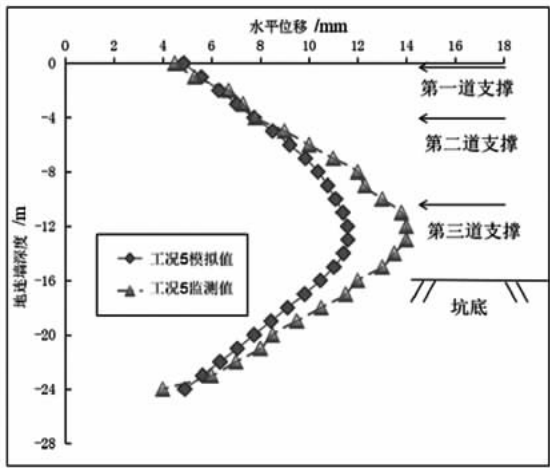


图 3 基坑开挖完成时地连墙水平位移的模拟值与监测值

4 数值模拟结果分析

4.1 基坑开挖步对地连墙水平位移的影响

实际工程施工中,地连墙墙体深层水平位移最大值及其出现的深度是最受关注的数数据,这是因为它们能够直观反映基坑的安全性,因此,本文模拟过程以及数据分析的重点均放在墙体深层水平位移上^[3]。图 4 为不同开挖步地连墙水平位移值,图 5 为不同开挖步地连墙最大水平位移值。由图 4 可见,地连墙的水平位移受基坑开挖深度的影响不同,最大水平位移值出现的位置随着开挖深度的增加而不断下移,最大值出现在开挖面附近。此外,不同工况下地连墙在同一深度的水平位移也随着开挖深度的变化而变化,且呈现出相似的规律。总体来看,数值模拟结果表现为:随着基坑的开挖,地连墙不同深度的水平位移变化呈现出内凸的规律。具体来看,基坑开挖至地表以下 4 m(工况 3)时,地连墙水平位移值较小,最大值约为

5.84 mm,出现在深度约为4 m的位置,且随着深度的增加,水平位移值不断减小,当深度为24 m时,趋于稳定,稳定值接近于0。这是因为工况3为基坑开挖初期,土体开挖量较小,开挖形成的基坑内外土压力差不大,基坑四周的土体变形较小,此时仅对围护结构上部的水平位移产生较大影响,位移变化幅度较小。基坑开挖至地表以下10 m(工况4)时,水平位移更加明显,且随着测点深度的增加呈现出先增大后减小的内凸形态,最大水平位移值约为8.45 mm,出现在深度9 m附近。基坑开挖至地表以下16 m(工况5)时,最大水平位移值约为11.61 mm,出现在深度14 m附近,最大水平位移值小于报警值20 mm。

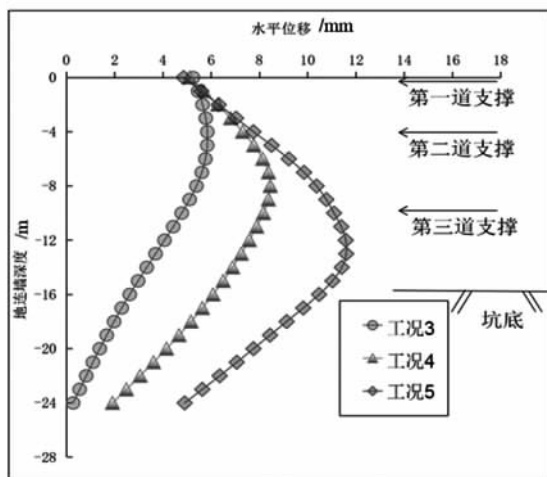


图4 不同开挖步地连墙水平位移值

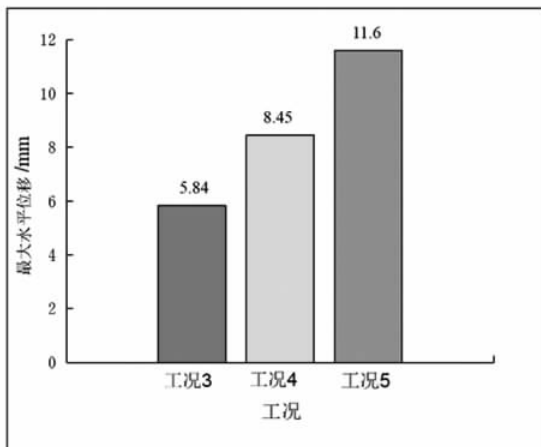


图5 不同开挖步地连墙最大水平位移值

通过分析可以发现,在基坑开挖过程中,地连墙水平位移对基坑开挖深度较敏感,且随着基坑开挖深度的增大而不断增大,且发生在开挖面附近,水平位移曲线呈内凸形态。此结论与麻凤海等^[26]在研究某深基坑支护结构变形影响参数时得出的结论一致。此外,由图4还可以发现,地连墙顶部的水平位移受基坑开挖深度的影响较小,始终保持在5 mm左右,这说明此次基坑开挖过程中第一道支撑对于基坑开挖引起的地连墙顶部的水平位移和变形有较好的约束效果。由于基坑开挖过程中地连墙在开挖面附近的水平位移相对较大,设计和施工时应加强开挖面处地连墙水平位移的监控,必要时可以根据实际需要加强开挖面处地连墙的配筋。同时,首道内支撑的设置位置及相关参数对于控制基坑开挖引起的地连墙顶部水平位移起着至关重要的作用,对此应引起足够的重视。

4.2 地连墙厚度对地连墙水平位移的影响

地连墙墙体刚度主要取决于厚度。为研究地连墙厚度对地连墙水平位移的影响,只改变地连墙的厚度,分别取值为600 mm,800 mm,1 000 mm以及1 200 mm,在不改变其他参数的条件下,将改变后的参数代入二维数值模型,数值模拟结果见图6和图7。由图6可见,改变地连墙厚度对地连墙水平位移有一定影响,且随着地连墙厚度的增加,地连墙的水平位移相应减小。此结论与刘熙媛等^[27]在研究某深基坑工程监测与变形影响因素有限元分析时得出的结论相吻合。这主要是因为增加地连墙厚度有助于提高地连墙的抗弯刚度,进而增强地连墙抵抗变形的能力。但地连墙厚度的改变不影响基坑开挖对地连墙水平位移的影响趋势。具体来看,当地连墙厚度分别为600 mm,800 mm,1 000 mm,1 200 mm时,对应的最大水平位移值约为14.9 mm,13.2 mm,11.6 mm,9.8 mm。由此可见,地连墙厚度越大,对控制地连墙水平位移也就越有利,但是增加厚度,施工成本也会增加,因此在实际设计和施工时可以利用这一特性来做好基坑的设计和施工工作,在成本条件允许的情况下采取增加地连墙厚度来减小基

坑开挖带来的变形影响,具体增加值需要根据工程实际情况来分析。

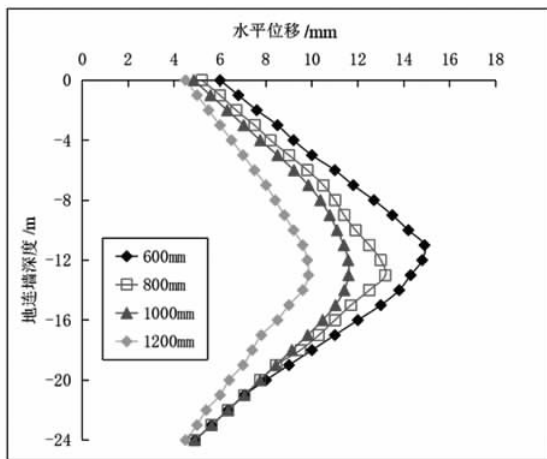


图 6 地连墙厚度对其水平位移的影响

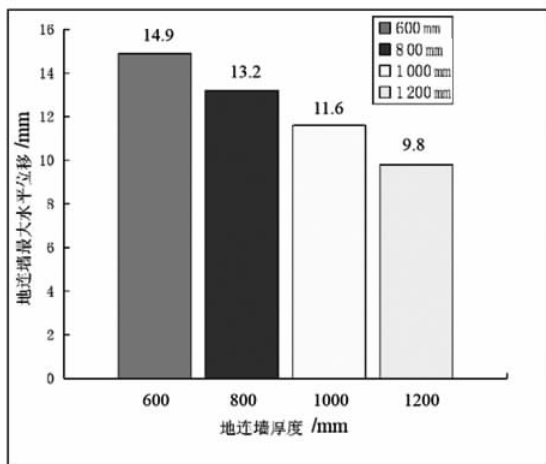


图 7 不同地连墙厚度下最大水平位移值

4.3 地连墙嵌固深度对地连墙水平位移的影响

地连墙入土深度是基坑设计中的一个重要参数。由地连墙入土深度不足而引发的支护结构倾斜坍塌曾造成了不少基坑事故。为研究地连墙嵌固深度对地连墙水平位移的影响,只改变地连墙嵌固深度,分别取值为 6 m, 8 m, 10 m 以及 12 m,在不改变其他参数的条件下,将改变后的参数代入二维数值模型,数值模拟结果见图 8 和图 9。由图 8 可见,改变地连墙嵌固深度对地连墙水平位移有一定影响,且随着地连墙嵌固深度的增加,地连墙的水平位移不断减小。地连墙嵌固深度的改变不影响基坑开挖

对地连墙水平位移的影响趋势,此结论与秦会来等^[28]在分析研究深厚淤泥地层深基坑变形影响因素时得出的结论一致。具体来看,当地连墙嵌固深度分别为 6 m, 8 m, 10 m, 12 m 时,对应的最大水平位移值约为 14.2 mm, 11.6 mm, 10.2 mm, 8 mm。由此可见,地连墙嵌固深度越大,对控制地连墙水平变形就越有利。但增加嵌固深度,施工成本也会增加,因此在实际设计和施工时,同地连墙厚度一样,是否通过增加地连墙嵌固深度来减小基坑开挖带来的变形影响应视工程实际情况而定。

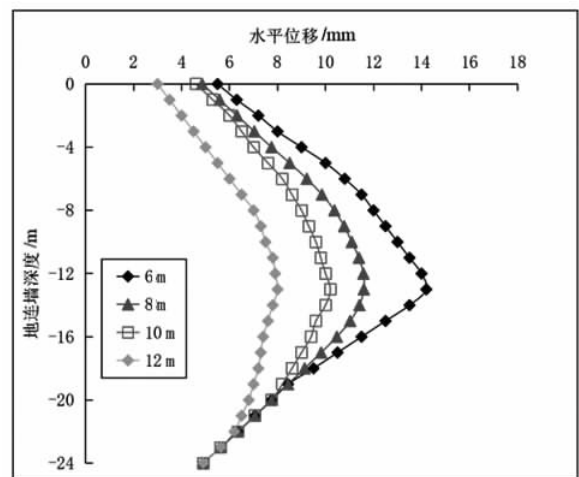


图 8 地连墙埋嵌固深度对其水平位移的影响

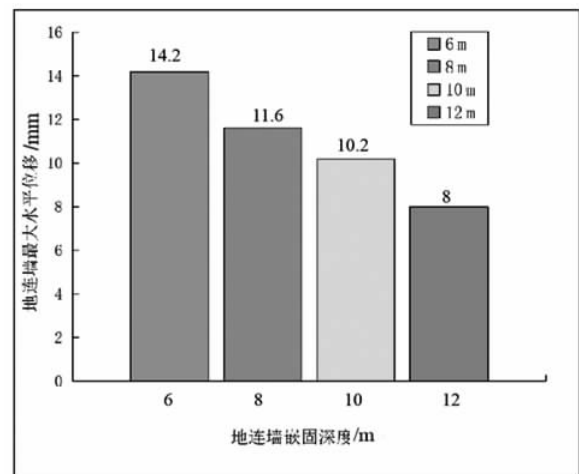


图 9 不同地连墙嵌固深度下最大水平位移值

4.4 地连墙厚度及嵌固深度对地连墙顶部水平位移的影响

图 10 和图 11 分别为地连墙厚度和嵌固深

度对地连墙顶部水平位移影响图。由图 10 及图 11 可以看出,地连墙顶部的水平位移随地连墙厚度及嵌固深度的增大而减小,这说明增加地连墙的厚度及嵌固深度对减小其顶部水平位移具有积极作用,虽然这种作用较小。具体来看,当地连墙厚度分别为 600 mm, 800 mm, 1 000 mm 及 1 200 mm 时,对应的地连墙顶部水平位移值约为 6.2 mm, 5.3 mm, 4.9 mm 及 4.2 mm;当地连墙嵌固深度分别为 6 m, 8 m, 10 m 及 12 m 时,对应的地连墙顶部水平位移值约为 5.8 mm, 5.1 mm, 4.5 mm 及 3.1 mm。由此也说明此基坑支护结构设计及施工相对合理,并且施工过程安排较为得当。

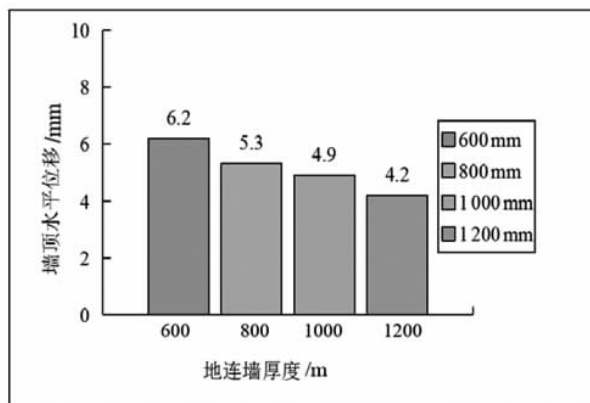


图 10 地连墙厚度对地连墙顶部水平位移的影响

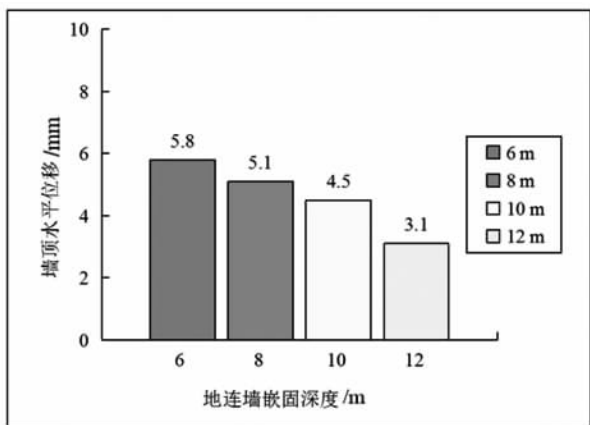


图 11 地连墙嵌固深度对地连墙顶部水平位移的影响

5 结论

通过 MIDAS/GTS NX 对基坑开挖及支护

全过程进行数值模拟,研究了深基坑开挖引起的地连墙水平位移变化规律,并对比现场监测数据进行了验证,主要结论如下。

(1)在基坑开挖完成时数值模拟的地连墙最大水平位移值约为 11.6 mm,现场监测的最大水平位移值约为 13.9 mm,数值模拟与现场监测结果吻合较好,验证了本文建立的二维数值模型的可行性和参数取值的合理性与可靠性。

(2)地连墙最大水平位移受基坑开挖深度影响较大,最大水平位移位于开挖面附近,地连墙顶部水平位移受基坑开挖深度影响较小,在基坑开挖过程中始终保持在 5 mm 左右。

(3)增大地连墙厚度及嵌固深度对抑制地连墙水平位移效果较好,但对地连墙顶部水平位移影响较小,在基坑设计和施工时可以利用这一特性,通过增加地连墙厚度及嵌固深度来减小基坑开挖对地连墙水平位移的影响。但增加地连墙厚度及嵌固深度会增加施工成本,因此不可盲目增加,要根据工程实际需要地对地连墙进行参数设计。

(4)此次研究中,地连墙顶部水平位移变化较小,这是因为此次基坑支护结构较合理、施工过程安排较得当,第一道支撑在抑制地连墙顶部水平位移上发挥着重要作用,因此在基坑设计和施工时对于第一道支撑的设置位置、施工时间以及相关参数设计要格外重视。

参考文献:

- [1] 周勇,张康康. 软弱夹层对深基坑水平位移影响的数值模拟分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3): 9-15.
- [2] 张艳书,薛栩超,庄海洋,等. 软土层对地铁狭长深基坑地表沉降的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1639-1651.
- [3] 丰土根,乔广轩,刘江涛,等. 悬挂式深基坑地下连续墙支护数值模拟及工程优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12679-12687.
- [4] 郭盼盼,龚晓南,汪亦显. 考虑土与结构非

- 线性接触特性的格形地下连续墙围护结构力学性状研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1201 - 1209.
- [5] 李立云, 王子英, 王晓静, 等. 近铁路基坑通风井段变形特征及其机制分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1441 - 1451.
- [6] 秦胜伍, 张延庆, 张领帅, 等. 基于 Stacking 模型融合的深基坑地面沉降预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1316 - 1323.
- [7] 魏纲, 赵毅, 孙樵. 基坑开挖引起带抗浮锚杆的盾构隧道变形计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4158 - 4167.
- [8] 易顺, 林伟宁, 陈健, 等. 基于随机场理论的基坑开挖地表及围护墙变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S2): 3389 - 3398.
- [9] 李俊, 王金昌, 谢家冲, 等. 基于应力叠加法的基坑开挖对邻近盾构隧道的影响研究[J]. 科技通报, 2021, 37(10): 112 - 119.
- [10] 朱栋梁, 林伟宁, 程贵海, 等. 基于光纤传感技术的桩体位移监测方法研究[J]. 人民长江, 2022, 53(5): 168 - 175.
- [11] 马少俊, 李鑫家, 王乔坎, 等. 某深基坑开挖对邻近既有盾构隧道影响实测分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2022, 4(1): 86 - 94.
- [12] 彭丽云, 朱同宇, 李焱, 等. 密贴既有线路基的双基坑开挖支护参数优化[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 237 - 245.
- [13] 李顺群, 马伟亮, 叶茂松, 等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 1 - 10.
- [14] 丁士龙, 孙志浩, 张恒志, 等. 风井深基坑开挖对坑角外浅基础建筑物的影响[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 827 - 835.
- [15] 刘畅, 马力遥, 郑刚, 等. 斜直交替基坑支护桩现场实测及机理研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 1 - 10.
- [16] 胡建林, 孙利成, 崔宏环, 等. 基于修正摩尔库伦模型的深基坑变形数值分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7717 - 7723.
- [17] 龚晓南. 基坑工程发展中应重视的几个问题[J]. 岩土工程学报, 2006(S1): 1321 - 1324.
- [18] 麻凤海, 胡国栋, 杨清源, 等. 大连地铁车站基坑变形特性分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2012, 31(2): 155 - 158.
- [19] 麻凤海, 陈霞, 刘增斌. 复杂条件下深基坑围护结构变形演化规律研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(4): 723 - 731.
- [20] 张振昌, 陈静. 某工程暗挖电力隧道地表沉降有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(S2): 172 - 175.
- [21] 丰土根, 乔广轩, 刘江涛, 等. 悬挂式深基坑地下连续墙支护数值模拟及工程优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12679 - 12687.
- [22] 孙志浩, 雷菲菲, 薛文静, 等. 非对称荷载下内撑式基坑受力变形分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10222 - 10228.
- [23] 孔德森, 门燕青, 张伟伟, 等. 软土深基坑坑底抗隆起稳定性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 186 - 190.
- [24] 张仁伟. 合肥地铁伊宁站基坑工程开挖对邻近建筑物影响[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [25] 高亿文, 李明广, 陈锦剑. 超载影响下围护结构非对称基坑的受力及变形特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(6): 643 - 651.
- [26] 麻凤海, 杨天宇. 某深基坑支护结构变形影响参数研究[J]. 公路工程, 2021, 46(4): 66 - 72.
- [27] 刘熙媛, 陈中婧, 付士峰, 等. 某深基坑工程监测与变形影响因素有限元分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2016, 35(8): 852 - 858.
- [28] 秦会来, 黄俊, 李奇志, 等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 23 - 26.

(责任编辑: 冯兆娜)