

文章编号: 1005-0523(2019)06-0099-07

土体宽度非对称基坑变形特性分析

方焘¹, 刘春¹, 郭俊², 冉井念¹

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 南昌市政公用集团, 江西 南昌 330000)

摘要:采用 MIDAS/GTS 有限元软件对邻近有地铁车站形成的两侧土体宽度非对称的基坑开挖进行数值模拟, 详细分析一侧为半无限土体, 另一侧土体宽度由有限土体逐渐变为半无限土体的基坑变形特性, 并与现场监测数据进行对比分析。结果表明: 在厦门地区地层条件下, 基坑有限土体侧的变形明显小于半无限土体侧, 基坑有限土体侧土体宽度对基坑变形的影响范围为 1.5 倍左右基坑开挖深度。具体表现为随着基坑有限土体侧土体宽度的增大, 基坑坑底隆起值增大, 基坑半无限土体侧地表沉降量、桩体水平位移量减小, 基坑有限土体侧地表沉降量、桩体水平位移量增大, 基坑两侧变形逐渐变化至基坑两侧均为半无限土体时的变形量。

关键词:地铁; 变形特性; 数值模拟; 非对称基坑; 现场监测

中图分类号: U45 文献标志码: A

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.015

地铁出入口基坑紧邻地铁车站开挖^[1], 导致基坑围护结构与地铁车站之间的土体宽度有限。随着城市建设的快速发展, 地面空间日趋饱和, 工程实践中基坑外侧存在地铁车站等地下构筑物的情况也将越来越多。在此类工程中, 基坑与土和地下构筑物之间相互作用使得基坑的安全受邻近地下构筑物影响^[2]。为此有必要对此类基坑变形进行研究以指导实际工程中邻近地下构筑物基坑的设计与施工。

以往学者们对此类问题的探讨研究, 主要体现在对有限土体土压力计算公式的推导分析和基坑开挖对邻近既有构筑物的影响上。高印立^[3]、马平等^[4]分别基于土的塑性上限理论、极限平衡理论, 推导了有限土体土压力计算公式, 之后方焘等^[5]采用极限平衡法推导了放坡条件下有限土体主动土压力计算公式。黄东^[6]、应宏伟等^[7]对临近既有地下室的挡土墙土压力问题开展了数值分析和理论研究, 并得出了相应的有限土体土压力计算模型。曹前等^[8]通过数值分析对紧邻深基坑开挖的地铁车站柱、结构板和地下连续墙的内力和变形进行了研究。蔡武林^[9]、任伟明等^[10]运用数值模拟研究了紧邻地铁车站基坑开挖对既有地铁车站的结构变形影响。目前关于邻近地下构筑物基坑自身变形特性的研究成果报道较少。李志高等^[11]通过数值分析发现, 邻近基坑的地铁车站对基坑变形会有明显的遮拦作用, 且基坑离地铁车站越近, 遮拦作用就越明显。朱炎兵等^[12]认为文献[11]中只取 1/2 基坑模型进行分析, 模型边界条件与实际工程不符, 进而研究了多种参数组合下邻近既有地铁车站的基坑自身变形及其对周围环境的影响。吕科验^[13]采用数值分析的方法, 分析了基坑两侧有限土体范围对基坑桩顶水平位移、桩身最大弯矩和支护结构背后土压力等分布的影响。现有研究大多只分析了基坑邻近车站侧的情况, 对基坑两侧土体宽度不一致基坑变形特性的研究较少。

本文结合实际工程采用 MIDAS/GTS 有限元计算软件对邻近有地铁车站存在所形成的两侧土体宽度非对称的基坑开挖进行数值模拟, 并扩展模拟了基坑一侧为半无限土体(无车站存在), 另一侧被地铁车站阻

收稿日期: 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51568021); 南昌市政公用集团科技基金资助项目

作者简介: 方焘(1976—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为岩土工程, 道路与铁道工程。

通讯作者: 刘春(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为道路与铁道工程。

隔成不同土体宽度的情况,结合现场监测数据,对比分析了邻近有地铁车站存在所形成的两侧土体宽度非对称基坑的变形特性。

1 工程概况

厦门市轨道交通1号线某车站为地下二层岛式站台车站,车站基坑主体围护结构采用800 m厚地下连续墙+内支撑的支护体系,采用明挖顺作法施工,车站总长392.2 m,宽22.9 m,端头井深18.1 m,标准段深16.2 m,地连墙深度25 m。该车站3号出入口基坑长63.2 m,标准段宽8.0 m,开挖深度为10.0 m,围护结构采用 $\phi 800@1000$ 钻孔灌注桩,桩长16.0 m,冠梁截面为800 mm \times 1 000 mm,混凝土支撑截面为800 mm \times 600 mm,钢支撑为 $\phi 609$ mm,壁厚16 mm的钢管支撑。该车站3号出入口基坑右侧围护结构与地铁车站之间形成的土体宽度为5 m,基坑开挖过程中对基坑两侧地表沉降和桩体水平位移进行了现场监测。在基坑无车站侧布置有DBC2-1~4,DBC4-1~4两排共8个地表沉降监测点和CX2,CX4共2个桩体水平位移监测点,在基坑有车站侧布置有DBC1-1~4,DBC3-1~4两排共8个地表沉降监测点和CX1,CX3共2个桩体水平位移监测点,地表沉降监测点与相对应的桩体水平位移监测点均都在同一断面上,由于受现场施工的影响,实际只有CX1,CX2,CX3共3个孔的测斜数据可用。地铁车站与出入口基坑示意图如图1所示。

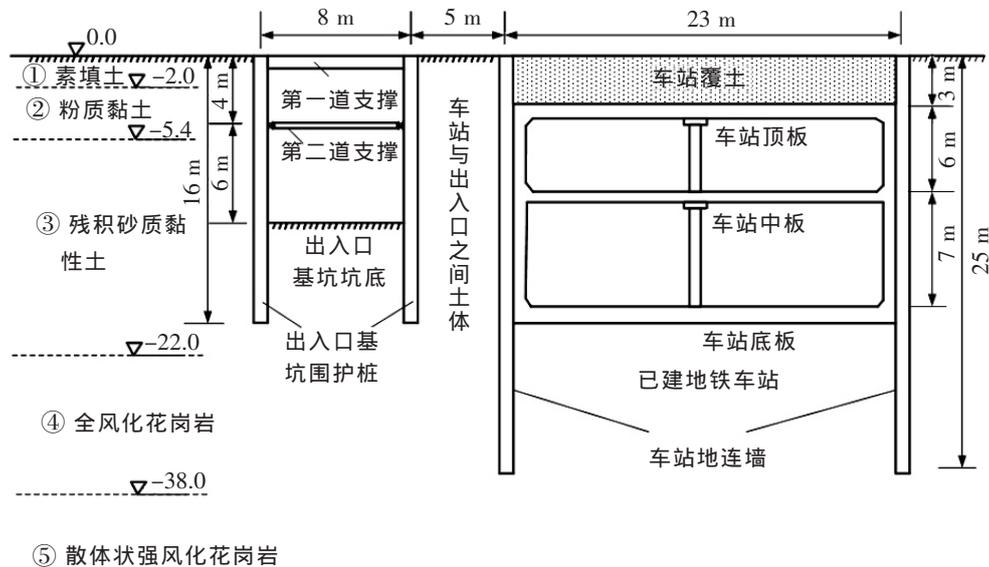


图1 车站与出入口基坑示意图

Fig.1 Schematic diagram of station and entrance foundation pit

2 现场监测与数值模拟分析

2.1 数值分析模型

采用MIDAS/GTS有限元计算软件建立二维基坑开挖模型,数值分析模型有限元网格如图2所示,模型二维尺寸为148 m \times 46 m,基坑开挖深度 h 为10 m。基坑左侧土体宽度取70 m代表基坑左侧为半无限土体,基坑右侧与地铁车站距离 D (即基坑有限土体侧土体宽度)分别为3,5,7,10,15,20,25 m,模型还包含一个右侧没有车站存在(即基坑两侧均为半无限土体)的情况作对比,共建立8个计算模型进行分析。模型边界设置为侧面约束水平方向移动,底部约束水平竖向移动,顶面为不设约束。基坑围护桩与土体、车站地连墙与土体之间均设置界面单元。模型分析工况设置为:① 初始地应力分析;② 地铁车站施工并清除车站施工位移;③ 基坑围护结构施工;④ 基坑开挖步骤一开挖至-1.5 m;⑤ 设置第1道混凝土支撑;⑥ 基坑开挖步骤二开挖至-5 m;⑦ 架设第2道钢支撑并对钢支撑施加100 kN预应力;⑧ 基坑开挖步骤三开挖至-8 m;⑨ 基坑开挖步骤四开挖至-10 m。

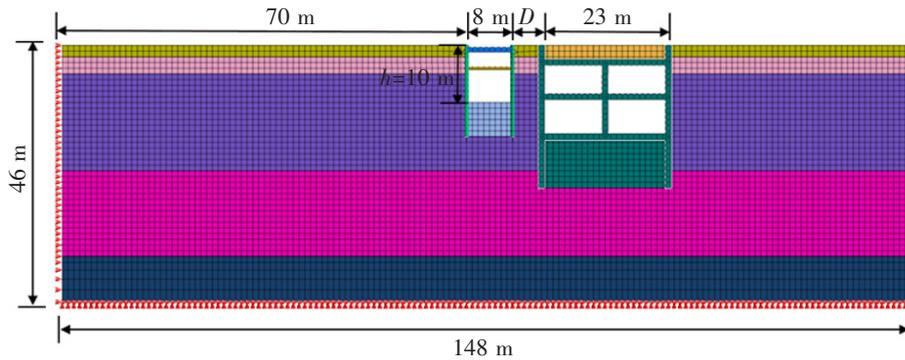


图 2 模型有限元网格图

Fig.2 Model finite element mesh diagram

2.2 计算参数

地铁车站地连墙和出入口基坑围护桩均采用 C35 混凝土,弹性模量为 35 GPa,泊松比为 0.20,重度为 25 kN/m³;出入口基坑混凝土支撑采用 C30 混凝土,弹性模量为 30 GPa,泊松比为 0.20,重度为 24.8 kN/m³;钢支撑弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.30。车站地连墙、基坑围护桩、基坑混凝土支撑采用梁单元模拟,钢支撑采用桁架单元模拟。基坑支护结构和车站的本构关系采用弹性模型,土体本构模型采用修正摩尔-库伦模型,根据地勘报告,土层物理力学参数表 1。

表 1 各层土物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层名称	土层厚度/m	重度/(kN/m ³)	变形模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
① 素填土	2	18	5.3	26.9	5	0.35
② 粉质黏性土	3.4	17.9	12	30	14	0.27
③ 残积砂质黏性土	17	18.9	18	26	21	0.29
④ 全风化花岗岩	15.6	19.8	30	23.8	26	0.25
⑤ 散体状全风化花岗岩	8	20	40	23.4	28	0.24

2.3 数值分析结果与监测结果对比分析

当 $D=5$ m 时,基坑开挖完成后,由图 3 基坑两侧地表沉降监测与数值分析值对比曲线可知,基坑两侧地表沉降监测与数值分析值曲线整体上均呈凹槽形,变化趋势大致相同,现场监测地表沉降值整体上均比数值分析值略大。基坑半无限土体侧地表沉降比有限土体侧大,基坑半无限土体侧、有限土体侧地表沉降数值分析最大沉降值分别为 5.82,2.29 mm,有限土体侧比半无限土体侧小 60.65%;基坑半无限土体侧、有限土体侧现场监测地表沉降最大量分别为 6.21,3.4 mm,有限土体侧比半无限土体侧小 45.24%。

当 $D=5$ m 时,基坑开挖完成后,由图 4 基坑两侧桩体水平位移监测与数值分析值对比曲线可知,(图中桩体向基坑内侧移动产生的位移为正,外侧为负,下同),基坑两侧桩体水平位移监测与数值分析值曲线整体上均呈“D”字形,变化趋势大致相同,桩体水平位移监测值整体上均比数值分析值略大。基坑半无限土体侧桩体水平位移比有限土体侧大,基坑半无限土体侧、有限土体侧桩体水平位移数值分析最大值分别为 8.95,5.2 mm,有限土体侧比半无限土体侧小 41.9%;基坑半无限土体侧、有限土体侧桩体水平位移现场监测最大值分别为 9.76,5.54 mm,有限土体侧比半无限土体侧小 43.24%。

由于在实际基坑工程开挖过程中基坑两侧地表常常受施工机械等不确定因素的影响,这些影响在数值分析过程中往往被忽略,导致现场监测值与数值分析值产生一定偏差,但通过数值分析结果与现场监测结

果的对比分析可知,监测结果和数值分析结果数值上变化趋势基本一致,说明数值分析模型是合理的。基坑邻近车站的存在对基坑的变形起到一定的遮拦作用,这与文献[11]所描述的一致,使得基坑有限土体侧的地表沉降和桩体水平位移均比半无限土体侧小。

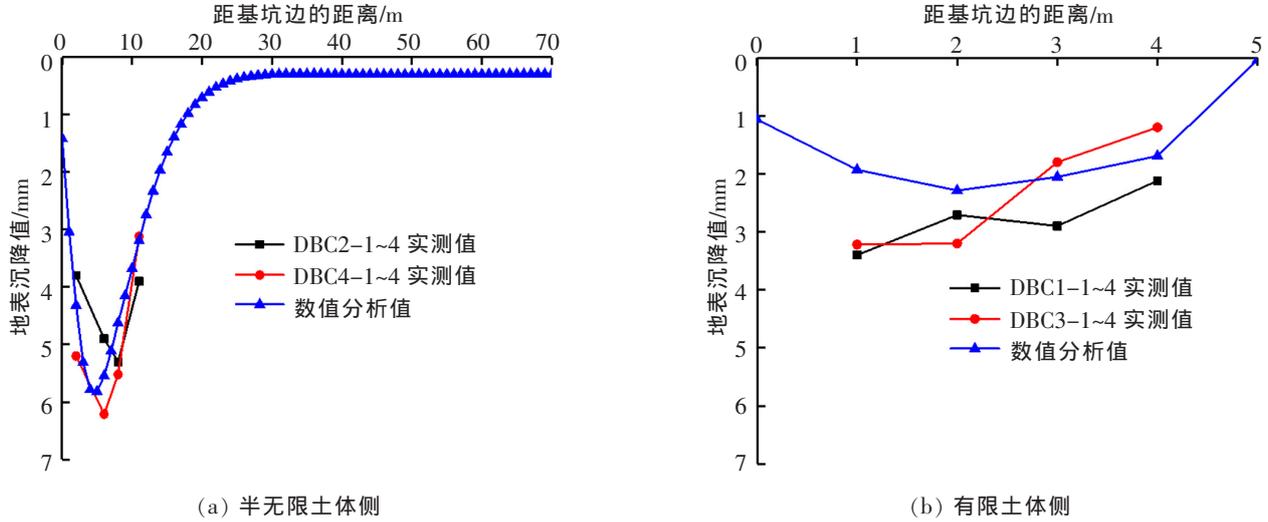


图3 基坑地表沉降监测与数值分析值对比

Fig.3 Comparison of ground subsidence monitoring and numerical analysis of foundation pit

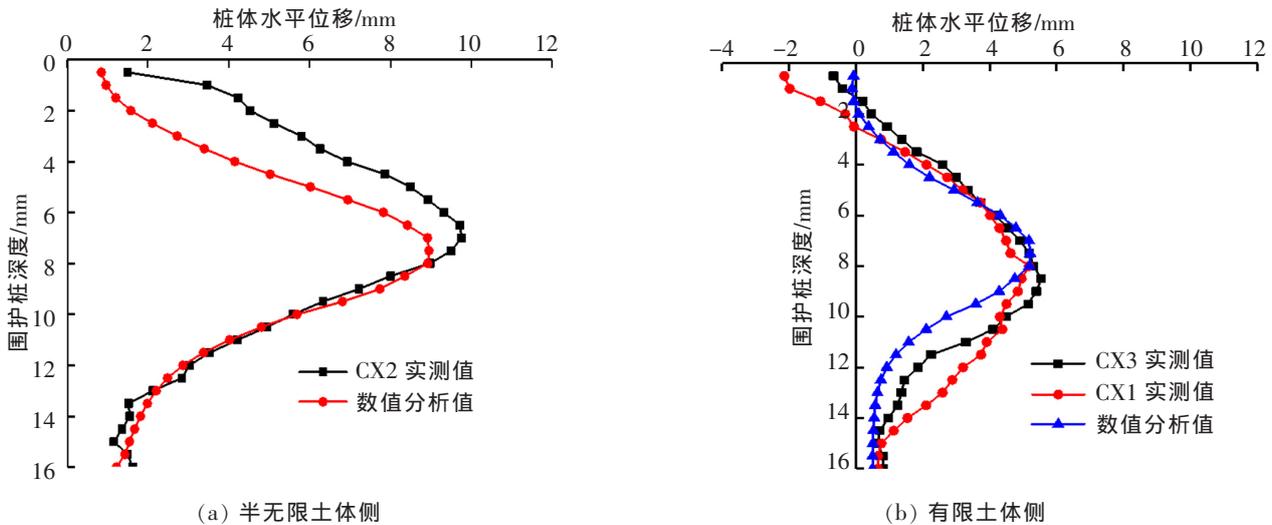


图4 基坑桩体水平位移监测与数值分析值对比

Fig.4 Comparison of horizontal displacement monitoring and numerical analysis of foundation pit pile

2.4 数值模拟扩展分析

为探究基坑有限土体侧土体宽度 D 对基坑变形的影响,取基坑有限土体侧土体宽度 D 为 3,5,7,10,15,20,25 m 和基坑两侧均为半无限土体 8 种工况进行数值分析。其中 $D=5$ m 的情况是实际存在的,在上节中已与实际监测数据进行对比分析,验证了计算模型的正确性。

2.4.1 8 种工况下基坑地表沉降规律分析

基坑半无限土体侧:随着 D 的增大,地表沉降曲线变化趋势一致,地表沉降曲线成凹槽形。由图 5 基坑地表沉降最大值与土体宽度 D 关系可知,当基坑两侧均为半无限土体时,基坑地表最大沉降量为 5.34 mm;当 $D=3$ m 时,基坑地表最大沉降量为 6.07 mm,比基坑两侧均为半无限土体时大 13.67%;当 $D=15$ m 时,基坑

最大沉降量为 5.41 mm,比基坑两侧均为半无限土体时大 1.31%;当 $D=20$ m 时,基坑最大沉降量为 5.39 mm,比基坑两侧均为半无限土体时大 0.94%;当 $D=25$ m 时,基坑最大沉降量为 5.36 mm,比基坑两侧均为半无限土体时大 0.37%。由此可以看出,地表沉降量随 D 的增大呈非线性减小, D 范围在从 0 增大至 1.5 h 时,地表沉降量减小明显; D 在 1.5 h 之后地表沉降量减小速度缓慢,并逐渐减小至基坑两侧均为半无限土体时的地表沉降量。

基坑有限土体侧:随着 D 的增大,地表沉降曲线由最初的三角形变为凹槽形。当 $D=3$ m 时,基坑地表最大沉降量为 1.08 mm,比基坑两侧均为半无限土体时小 79.77%;当 $D=15$ m 时,基坑最大沉降量为 5.02 mm,比基坑两侧均为半无限土体时小 5.99%;当 $D=20$ m 时,基坑最大沉降量为 5.22 mm,比基坑两侧均为半无限土体时小 2.24%;当 $D=25$ m 时,基坑最大沉降量为 5.30 mm,比基坑两侧均半无限土体时小 0.75%。由此可以看出,地表沉降量随 D 的增大呈非线性增大, D 范围从 0 增大至 1.5 h 时,地表沉降量增大明显; D 在 1.5 h 之后地表沉降量增大速度缓慢,并逐渐增大至基坑两侧均为半无限土体时的地表沉降量。

2.4.2 8 种工况下基坑桩体水平位移规律分析

基坑半无限土体侧:随着 D 的增大,桩体水平位移曲线变化趋势基本一致,桩体水平位移曲线呈“D”字形。由图 6 基坑桩体水平位移最大值与土体宽度 D 的关系可知,基坑两侧均为半无限土体时,桩体最大水平位移为 7.94 mm;当 $D=3$ m 时,桩体最大水平位移为 9.19 mm,比基坑两侧均半无限土体时大 13.6%;当 $D=15$ m 时,桩体最大水平位移为 8.13 mm,比基坑两侧均为半无限土体时大 2.39%;当 $D=25$ m 时,桩体最大水平位移为 8.00 mm,比基坑两侧均为半半无限土体时大 0.76%。由此可以看出,桩体水平位移随 D 的增大呈非线性减小, D 范围从 0 增大至 1.5 h 时,桩体水平位移减小明显; D 在 1.5 h 之后桩体水平位移减小速度缓慢,并逐渐减小至基坑两侧均为半无限土体时的桩体水平位移量。

基坑有限土体侧:随着 D 的增大,桩体水平位移曲线变化趋势基本一致,桩体水平位移曲线也呈“D”字形。当 $D=3$ m 时,桩体最大水平位移为 3.91 mm,比基坑两侧均为半无限土体时小 50.76%;当 $D=15$ m 时,桩体最大水平位移为 7.58 mm,比基坑两侧均半无限土体时小 4.53%;当 $D=25$ m 时,桩体最大水平位移为 7.83 mm,比基坑两侧均半无限土体时小 1.39%。由此可以看出,桩体水平位移随 D 的增大呈非线性增大, D 范围从 0 增大至 1.5 h 时,桩体水平位移增大明显; D 在 1.5 h 之后桩体水平位移增大速度缓慢,并逐渐增大至基坑两侧均半无限土体时的桩体水平位移量。

2.4.3 8 种工况下基坑坑底隆起值规律分析

有限土体侧土体宽度 D 对基坑坑底隆起的

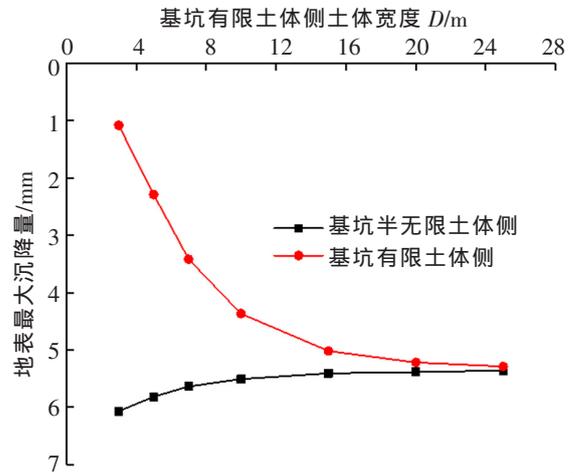


图 5 基坑地表沉降最大值与土体宽度 D 的关系
Fig.5 The relationship between the maximum surface settlement of foundation pit and the soil width D

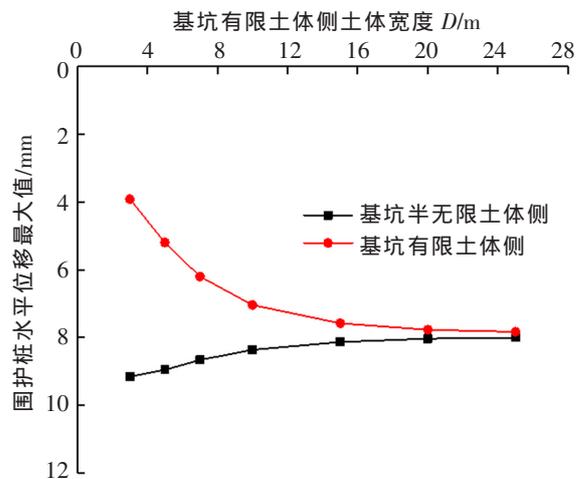


图 6 基坑桩体水平位移最大值与土体宽度 D 的关系
Fig.6 The relationship between maximum horizontal displacement of foundation pit pile and soil width D

影响范围也在 $1.5h$ 左右。基坑两侧均为半无限土体时, 基坑坑底隆起呈两头稍小, 中间略大的对称曲线。由表 2 距基坑半无限土体侧围护结构不同距离坑底隆起值与 D 的关系可知, 基坑坑底隆起值随 D 的增大而增大, 但隆起值在距离基坑半无限土体侧由近到远增幅不断增大, 并逐渐增大至基坑两侧均为半无限土体时基坑的坑底隆起值。 D 对基坑坑底隆起值影响最大的位置出现在距基坑半无限土体侧围护结构 7 m 的位置, D 对靠近基坑半无限土体侧围护结构的坑底隆起影响不大, 对靠近基坑有限土体侧围护结构的坑底隆起影响大。

表 2 距基坑半无限土体侧围护结构不同距离坑底隆起值与 D 的关系
Tab.2 The relationship between D and the heave value of the pit bottom at different distances from the semi-infinite soil side retaining structure of the pit

土体宽度 D/m	距基坑半无限土体侧围护结构 距离 1 m 坑底隆起值/ mm	距基坑半无限土体侧围护结构 距离 4 m 坑底隆起值/ mm	距基坑半无限土体侧围护结构 距离 7 m 坑底隆起值/ mm
3	10.56	10.47	9.63
5	10.64	10.61	10.05
7	10.68	10.7	10.33
10	10.73	10.78	10.56
15	10.76	10.84	10.72
20	10.77	10.85	10.77
25	10.76	10.85	10.77

3 结论

通过对邻近有地铁车站存在所形成的两侧土体宽度非对称(即基坑一侧为半无限土体, 另一侧土体宽度 D 由有限土体逐渐变为半无限土体)的基坑开挖进行数值模拟, 并结合现场监测数据分析发现:

1) 邻近地铁车站的存在对基坑有限土体侧的变形有明显的遮拦作用, 使得基坑有限土体侧变形明显小于半无限土体侧。基坑有限土体侧土体宽度对基坑变形的影响为 1.5 倍左右基坑开挖深度。

2) 基坑半无限土体侧地表沉降量、桩体水平位移量随有限土体侧土体宽度的增大而减小, 并逐渐减小至基坑两侧均为半无限土体时的地表沉降量、桩体水平位移量。基坑有限土体侧地表沉降量、桩体水平位移量随有限土体侧土体宽度的增大而增大, 并逐渐增大至基坑两侧均为半无限土体时的地表沉降量、桩体水平位移量。

3) 基坑有限土体侧土体宽度对坑底隆起有一定的影响, 基坑隆起值随有限土体侧土体宽度的增大而增大, 但隆起值在距离基坑半无限土体侧围护结构由近到远增幅不断增大, 并逐渐增大至基坑两侧均为半无限土体时的坑底隆起值。

研究结果对邻近有地下构筑物存在的两侧土体宽度非对称的基坑围护结构设计与施工具有一定的指导作用, 在此类基坑工程的设计与施工中可以根据基坑两侧变形的差异性采取合理的安全控制措施, 减少工程风险。

参考文献:

- [1] 姚显贵. 地铁出入口建筑设计理论与实践[J]. 隧道建设(中英文), 2014, 34(12): 1153-1162.
- [2] LIAO S M, LIU J H, WANG R L, et al. Shield tunneling and environment protection in Shanghai soft ground[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2009, 24(4): 454-465.
- [3] 高印立. 有限土体土压力的计算探讨[J]. 建筑科学, 2000, 16(5): 53-56.
- [4] 马平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S1): 3070-3074.
- [5] 方焘, 王海龙, 杨锐锐, 等. 放坡条件下有限土体主动土压力计算[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(4): 50-55.
- [6] 黄东. 临近既有地下室挡土墙主动土压力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [7] 应宏伟, 黄东, 谢新宇. 考虑邻近地下室外墙侧压力影响的平动模式挡土墙主动土压力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2970-2978.
- [8] 曹前, 秦鹏, 周云. 同深基坑开挖对紧邻地铁车站特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1494-1500.
- [9] 蔡武林. 深基坑开挖对临近地铁站及区间影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 222-226.
- [10] 任伟明, 彭丽云, 刘军. 邻近地铁车站的基坑开挖基于 FLAC~(3D)数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 276-280.
- [11] 李志高, 曾远, 刘国彬. 邻近地铁车站基坑开挖位移传递规律数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3104-3108.
- [12] 朱炎兵, 周小华, 魏仕锋, 等. 临近既有地铁车站的基坑变形性状研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2997-3002.
- [13] 吕科验. 基坑支护结构两侧有限土体作用数值模拟分析[J]. 铁道建筑技术, 2017(4): 104-108.

Analysis on Deformation Characteristics of Foundation Pit with Asymmetric Soil Width

Fang Tao¹, Liu Chun¹, Guo Jun², Ran Jingnian¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Nanchang Municipal Public Group, Nanchang 330000, China)

Abstract: Numerical simulations for the excavation of asymmetrical foundation pit is formed on both sides of soil mass near the subway station with the finite element software of MIDAS/GTS. In this paper, the deformation characteristics of the foundation pit of the semi-infinite soil body on one side and the semi-infinite soil body on the other side were analyzed in details. The comparative analysis was conducted with field monitoring data. It was found that under the typical stratum condition in Xiamen, the deformation of finite soil side of foundation pit was obviously less than the infinite soil side, and the influence range of the width of soil on finite soil side of the foundation pit was about 1.5 times of the excavation depth. Specifically, with the increase of the width of soil on the finite soil side of foundation pit, the heave values increased while the surface settlement and the horizontal displacement of pile on the infinite soil side of foundation pit decreased. The surface settlement and the horizontal displacement of pile on the finite soil side of foundation pit increased and the deformation of foundation pit gradually changed to the deformation when both sides of foundation pit were infinite soil sides.

Key words: subway; deformation characteristics; numerical simulation; asymmetric foundation pit; field measurement