

软土层厚度和基坑宽度对地铁车站基坑变形的影响

臧延伟

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 311122, 杭州//正高级工程师)

摘要 为研究软土层厚度和基坑宽度对地铁车站基坑变形的影响,基于Plaxis软件建立了地铁车站基坑变形的二维有限元模型。根据模拟计算结果,分析了不同地层厚度和基坑宽度对基坑围护结构水平变形、基坑隆起变形和基坑外地表沉降的影响。研究结果表明:围护结构变形曲线呈抛物线;基坑隆起变形呈“中间大,两边小”的单峰值形态;不同基坑宽度下,地表最大沉降与软土层厚度呈线性关系。

关键词 地铁车站;软土层;基坑变形

中图分类号 TU433;U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.09.021

Influence of Soft Soil Layer Thickness and Foundation Pit Width on Metro Station Foundation Pit Deformation

ZANG Yanwei

Abstract To study the influence of soft soil layer thickness and foundation pit width on metro station foundation pit deformation, a 2D finite element model of metro station foundation pit deformation is built based on Plaxis software. According to the simulation calculation results, the influence of different stratum thickness and foundation pit widths on foundation pit enclosure structure horizontal deformation, foundation pit heave deformation and foundation pit external ground surface settlement is analyzed. Research results show that the enclosure structure deformation curve is parabolic; foundation pit heave deformation displays single peak value form of 'middle large, side small'; at different foundation pit widths, the maximum ground surface settlement and soft soil layer thickness displays linear relation.

Key words metro station; soft soil layer; foundation pit deformation

Author's address HydroChina Huadong Engineering Co., Ltd., 311122, Hangzhou, China

在软土地区的基坑开挖过程中,坑内土体的开挖会引发坑底隆起、围护结构变形及坑外地表沉降,而基坑宽度、软土层厚度及埋深等因素的变化

会导致基坑和周边环境的变形规律有所不同。这为基坑设计及变形预测带来了较大的困难。因此分析研究基坑变形的影响因素是非常有意义的。

目前,已有学者通过数值分析法对软土地区地铁车站基坑变形的影响因素进行了研究。文献[1]分别讨论了开挖深度、开挖宽度、墙体入土深度和被动区加固对墙体位移的影响。文献[2]通过改变软土层厚度、埋深和开挖深度等不同参数组合的108种计算工况,系统地分析了软土层厚度和埋深变化对地铁狭长深基坑周围地表沉降的影响规律。文献[3]基于不同基坑开挖宽度下的坑底隆起作用区的变化情况,提出考虑坑底隆起宽度效应的基坑分类方法。文献[4]针对基坑变形的尺度效应,通过二维有限元模拟宽深比对基坑变形的影响规律,并研究了基于尺度效应的基坑变形控制措施。

既有研究表明,基坑宽度及软土层分布对基坑变形有较大影响,但目前对二者组合情况下的影响规律研究较少。本文通过建立地铁车站基坑开挖有限元模型,分析基坑宽度和软土层厚度对地铁车站基坑变形的影响。

1 二维有限元模型简介

1.1 几何模型

基于Plaxis有限元软件建立二维地铁车站模型。单一型地铁车站基坑宽度约为15~20 m,换乘型地铁车站基坑宽度较大,约为30~40 m,为研究不同基坑宽度的变形规律,分别建立宽度为15 m、20 m、25 m、30 m、40 m、50 m的基坑。基坑开挖深度为16 m,围护结构采用地下连续墙,墙长为32 m。设4道支撑,支撑高度分别为1 m、6 m、11 m、15 m,其中第1道和第3道为混凝土支撑,第2道和第4道为钢支撑。模型水平边界为基坑宽度向两侧延伸50 m,总深度为40 m。

1.2 材料参数

模型土体材料共分为软土层、硬土层及岩层3种。各土层参数取值借鉴了文献[5]的杭州软土地铁车站

基坑土层参数(见表1)。地下连续墙材料为混凝土,支撑材料分别为 ϕ 609 mm \times 16 mm 及 C35 混凝土。

1.3 计算工况

在不考虑地下水渗流的情况下,本文模拟的是

水下开挖过程,具体工况为:①激活地下连续墙;②开挖至4 m,设第1道支撑;③开挖至8 m,设第2道支撑;④开挖至13 m,设第3道支撑;⑤开挖至16 m,设第4道支撑。

表 1 模型土体物理力学参数^[5]

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil in the model^[5]

岩土材料	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	割线刚度/ MPa	切线刚度/ MPa	重新卸载/ 加载刚度/MPa	泊松比	渗透系数/ (m ³ /d)	侧压力 系数
软土层	17	14.0	11.0	6	6	18	0.40	5.18×10^{-4}	0.60
硬土层	17	12.7	31.5	18	18	54	0.35	1.73×10^{-3}	0.48
岩层	180	200.0	30.0	30	30	90	0.20	1.00×10^{-5}	0.40

2 计算结果分析

基于 Plaxis 软件建立 30 组二维地铁车站基坑开挖的有限元模型。根据计算结果可知,若基坑宽度及软土层厚度不同,基坑开挖引起的变形特点肯定有所差异。本文研究围护结构水平变形、坑底隆起变形及坑外地表沉降在不同条件下的变化规律。

2.1 围护结构水平变形

在不同基坑宽度及软土层厚度条件下,围护结构随基坑开挖深度的水平变形如图 1 所示。由图 1 可知,不同参数组合下的围护结构变形曲线均呈抛物线式,在 20 m(约 1.25 倍开挖深度)深度附近处水平位移最大,且随着软土层厚度的增大,围护结构的最大水平位移点逐渐向下移动。此外,基坑宽度越大、软土层越厚,围护结构的变形越大。

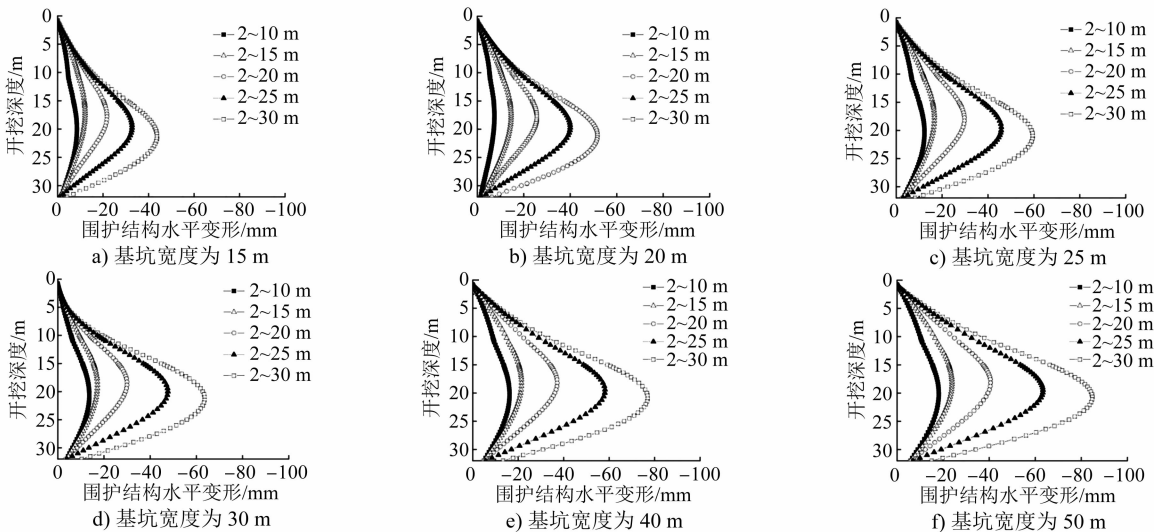


图 1 不同基坑宽度与软土层厚度下的围护结构水平变形

Fig.1 Horizontal deformation of enclosure structure with different foundation pit widths and soft soil layer thickness

图 2 和图 3 为不同基坑宽度与软土层厚度下的围护结构最大水平变形及底部水平变形。由图 2 可知,当基坑宽度一定时,围护结构的最大水平变形与软土层厚度的变化规律呈“双折线”形态。当软土层厚度从 8 m 增大至 13 m 时,围护结构的最大水平变形呈逐渐增大的趋势,但其变化速率较小,仅增大 5~7 mm。当软土层厚度大于 15 m 时,随着软土层厚度的增大,围护结构的水平变形增长速率也增大,且基本呈线性增长。这是由于内撑式基坑开

挖结束时,围护结构的最大变形一般发生在坑底(16 m)处。当软土层厚度小于 15 m 时,在基坑开挖结束后,坑底已无软土层分布,所以软土层的厚度大小对围护的最大变形影响不大。当软土层厚度大于 15 m 时,基坑开挖结束后坑底仍有软土层分布,且软土层厚度越大,对围护变形的影响越明显。

由图 3 可知,围护结构的底部水平变形随软土层厚度的变化规律也呈“双折线”式。当软土层厚度小于 25 m 时,软土层厚度对围护结构的底部水平

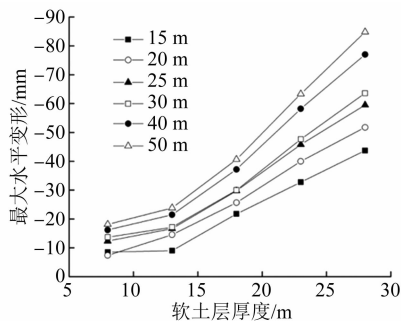


图2 不同基坑宽度下软土层厚度与围护结构最大水平变形的关系

Fig. 2 Relationship between soft soil layer thickness and enclosure structure maximum horizontal deformation with different foundation pit widths

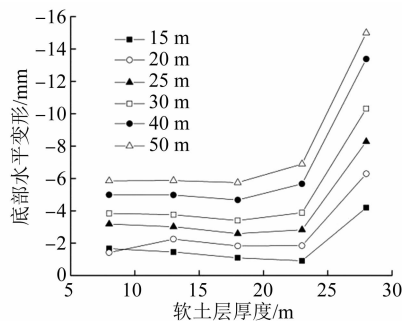


图3 不同基坑宽度下软土层厚度与围护结构底部水平变形的关系

Fig. 3 Relationship between soft soil layer thickness and enclosure structure bottom horizontal deformation with different foundation pit widths

变形无明显影响。当软土层厚度达到28 m时,围护结构的底部水平变形显著增大。这表明当软土层距墙底较远时,其分布对底部变形的影响不大;当软土层分布距墙底小于5 m时,软土层越厚,围护结

构的底部水平变形越大。

2.2 坑底隆起变形

在不同基坑宽度及软土层厚度条件下,坑底隆起变形如图4所示。由图4可以看出:

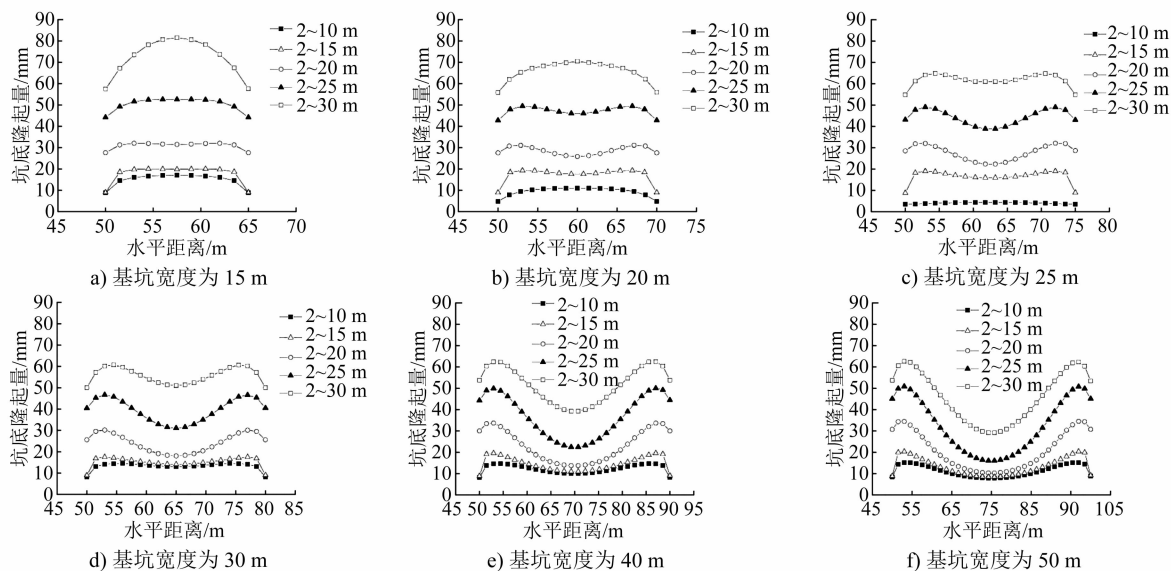


图4 基坑宽度与坑底隆起变形的关系

Fig. 4 Relationship between foundation pit width and pit bottom heave deformation

1) 当基坑宽度一定时,软土层厚度越大,其隆起变形的形态特征越明显。当基坑宽度较小时(基坑宽度为15 m和20 m),随着软土层厚度的增大,隆起变形逐渐从“平台式”的无明显峰值形态或“两边大、中间小”的双峰形态,转变为“中间大、两边小”的单一峰值形态。当基坑宽度达到30 m时,随着软土层厚度的增大,隆起变形逐渐从“平台式”的无明显峰值形态,转变为“两边大、中间小”的双峰形态,且均无“中间大、两边小”的单一峰值形态

出现。

2) 当基坑的软土层深度为2~30 m时,狭长型基坑宽度(15~25 m)越大,其最大隆起量越小,两者相差约10 mm;当基坑宽度大于25 m时,其最大隆起量基本不随基坑宽度的增大而变化。

不同软土层厚度下,50 m宽基坑开挖引起的潜在滑动面形态如图5所示。由图5可以看出,当软土层厚度较小时,坑内中间位置的土体变形基本不受两侧滑动面影响,此时坑内中间位置的土体变形

大小不受软土层厚度变化的影响;随着软土层厚度的增大,两侧滑动面相交,导致坑底隆起中间增大,且软土层厚度越大,两侧滑动面的重叠部分越多,其相应位置的隆起变形也越大。

根据文献[6-8]的研究,基坑滑动面的影响范围与内摩擦角及开挖深度等因素有关。分别计算不同软土层厚度下的滑动面边界值,结果如表 2 所示。由表 2 可知,随着软土层厚度的增大,内摩擦角

的取值逐渐减小,由抗倾覆稳定性模型及地基承载力抗隆起稳定性模型计算获得的影响范围逐渐减小,圆弧滑动抗隆起稳定性模型计算影响范围不变,而基于离心试验的滑动面模型计算影响范围则逐渐增大。由图 5 可知,滑动面的影响范围随软土层的增大而增大,该变化趋势与基于离心试验的滑动面模型计算结果相同,且两者在数值上也较为接近。

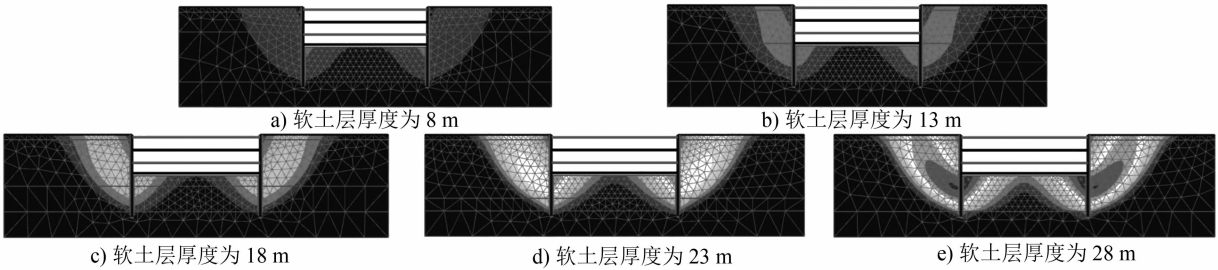


图 5 各软土层厚度下的 50 m 宽基坑变形色谱

Fig. 5 Deformation chromatogram of 50 m wide foundation pit with soft soil layer of each thickness

表 2 各滑动面模型及色谱图影响范围

Tab. 2 Influence range of each sliding surface model and chromatogram

模型类型	坑内隆起影响范围表达式	软土层厚度/m				
		8	13	18	23	28
抗倾覆稳定性模型	$D\tan\left(\frac{\pi+\phi}{4}+\frac{\phi}{2}\right)$	1.63 <i>D</i>	1.56 <i>D</i>	1.48 <i>D</i>	1.41 <i>D</i>	1.35 <i>D</i>
圆弧滑动抗隆起稳定性模型	$\sqrt{D'^2-(H-H')^2}$	1.17 <i>D</i>	1.17 <i>D</i>	1.17 <i>D</i>	1.17 <i>D</i>	1.17 <i>D</i>
地基承载力抗隆起稳定性模型	$2Dc\left(\frac{\pi+\phi}{4}+\frac{\phi}{2}\right)\tan\phi\cos\left(\frac{\pi-\phi}{4}-\frac{\phi}{2}\right)$	2.88 <i>D</i>	2.65 <i>D</i>	2.46 <i>D</i>	2.29 <i>D</i>	2.13 <i>D</i>
基于离心试验的滑动面模型	$2Dc\left(\frac{\pi-\phi}{4}+\frac{\phi}{2}\right)\tan\phi\cos\left(\frac{\pi+\phi}{4}+\frac{\phi}{2}\right)$	0.79 <i>D</i>	0.83 <i>D</i>	0.88 <i>D</i>	0.93 <i>D</i>	0.98 <i>D</i>
色谱图滑动面影响范围	—	0.75 <i>D</i>	0.77 <i>D</i>	0.80 <i>D</i>	0.84 <i>D</i>	0.93 <i>D</i>

注: *D*——围护结构插入坑底以下的长度;*D'*——最下道支撑至墙底的距离;*H*——墙长;*H'*——地表至最下道支撑的距离; ϕ ——内摩擦角。

2.3 坑外地表沉降

在不同基坑宽度及软土层厚度条件下,坑底的地表沉降如图 6 所示。由图 6 可知,不同参数组合下的地表沉降曲线均符合“凹槽型”变形模式,最大沉降基本都发生在墙后 10~15 m 处,且基坑宽度越大、软土层越厚,凹槽越明显。当软土层厚度较小(2~10 m)时,地表最大沉降量约为 10 mm,且基本不受基坑宽度影响。随着软土层厚度的增大,地表沉降量明显增大。当软土层分布于地下 2~30 m 时,地表最大沉降量达到 30~65 mm,且受基坑宽度显著影响。对于地表沉降影响范围,各工况的计算结果均显示地表沉降主要发生在墙后 35~40 m 范围内,约为 2.0~2.5 倍开挖深度。

以 20 m 宽度基坑为例,以正态分布计算沉降变形,拟合曲线与数值模拟结果对比如图 7 所示,其

中,拟合时的沉降影响范围取为 1.5 倍基坑宽度。由图 7 可知,当软土层厚度较小时,该影响范围与数值模拟结果较为接近;当软土层厚度增大至 25 m 时,数值模拟结果显示沉降影响范围约为 2 倍的基坑宽度,在远离围护结构处的变形形态与拟合结果有一定差异。这是由于正态分布计算公式是基于上海软土地区深基坑开挖提出的,而该地区的软土层厚度约为 10~15 m,所以拟合结果与数值模拟结果相吻合。

借助统计学中的归一化方法,将最大沉降点距离墙后的距离及软土层厚度除以开挖深度,进一步转变为无量纲量。不同基坑宽度及软土层厚度条件下的最大沉降相对距离及最大沉降值数据如图 8 和图 9 所示。不同基坑宽度下,地表最大沉降关系 *y* 与软土层厚度 *x* 的拟合曲线公式为:

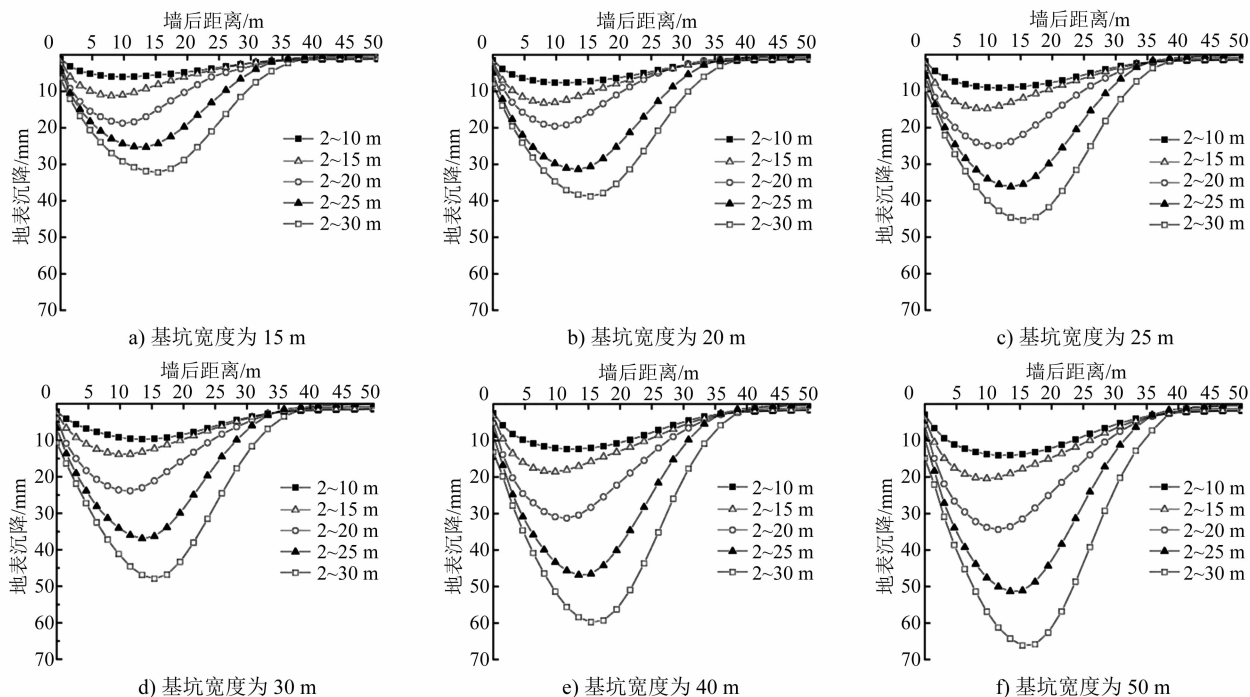


图 6 不同基坑宽度下墙后距离与地表沉降变形的关系

Fig. 6 Relationship between behind-wall distance and the surface settlement deformation with different foundation pit widths

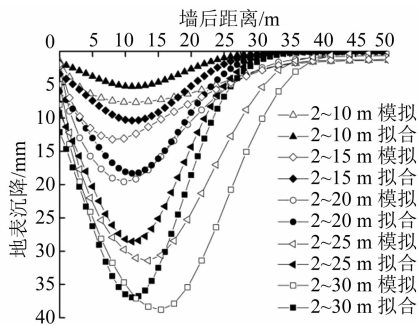


图 7 沉降拟合曲线及其数值模拟结果对比图

Fig. 7 Settlement fitting curve and comparison diagram of numerical simulation results

$$\begin{aligned}
 y &= -1.406x + 7.280, d = 15 \text{ m} & (1) \\
 y &= -1.611x + 6.863, d = 20 \text{ m} & (2) \\
 y &= -1.881x + 7.797, d = 25 \text{ m} & (3) \\
 y &= -1.990x + 9.354, d = 30 \text{ m} & (4) \\
 y &= -2.464x + 10.592, d = 40 \text{ m} & (5) \\
 y &= -2.703x + 11.38, d = 50 \text{ m} & (6)
 \end{aligned}$$

式中:

d ——基坑宽度。

由图 8 可知,当软土层相对厚度小于 0.8 时,软土层越厚,最大沉降点距围护结构越近;当软土层相对厚度大于 0.8 时,软土层越厚,最大沉降点距围护结构越远。当软土层相对厚度小于 1.5 时,基坑

宽度越大,最大沉降点距围护结构越远;当软土层相对厚度大于 1.5 时,基坑宽度对最大沉降点位置几乎无影响。

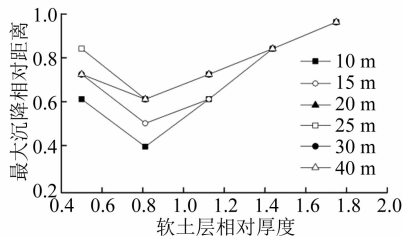


图 8 不同基坑宽度下软土层相对厚度与最大沉降相对距离的关系

Fig. 8 Relationship between relative thickness of soft soil layer and maximum settlement relative distance with different foundation pit widths

由图 9 可知,地表最大沉降和软土层厚度的关系基本呈线性增长,这说明软土层厚度对地表沉降变形有显著影响。分析式(1)~式(6)可知,当软土层厚度较小时,基坑宽度对地表最大沉降变形的影响不大,如软土层厚度取为 8 m 时,15 m 宽基坑及 50 m 宽基坑的最大沉降变形仅相差约 5 mm;当软土层厚度大于 20 m 时,不同宽度的基坑最大沉降变形差距明显,15 m 宽基坑及 50 m 宽基坑的最大沉降变形相差约 30 mm。

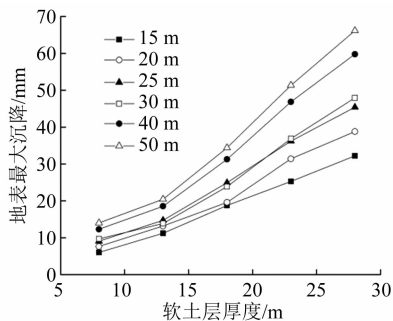


图9 不同基坑宽度下软土层厚度与地表最大沉降值的关系

Fig. 9 Relationship between soft soil layer thickness and maximum ground settlement with different foundation pit widths

3 结论

1) 不同参数组合下的围护结构变形曲线均呈抛物线式,随着软土层厚度的增大,围护结构的最大水平位移点逐渐向下移动。

2) 当基坑宽度较小时,其隆起变形呈“中间大、两边小”的单一峰值形态,随着基坑宽度的增大,其变形形态逐渐转向“平台式”的无明显峰值形态或“两边大、中间小”的双峰形态,且软土层厚度越大,坑内隆起的单一峰值形态或双峰形态越明显。

3) 随着软土层厚度的增大,色谱图滑动面影响范围有所增大,该变化趋势与基于离心试验的滑动面模型计算结果相同,且两者在数值上也较为接近。

4) 不同参数组合下的地表沉降曲线均符合“凹槽型”变形模式。通过多工况模拟,给出了不同基坑宽度下,地表最大沉降与软土层厚度的拟合公式,两者基本呈线性关系。

参考文献

- [1] 高文华,杨林德,沈蒲生. 软土深基坑支护结构内力与变形时空效应的影响因素分析[J]. 土木工程学报,2001(5):90.
GAO Wenhua, YANG Linde, SHEN Pusheng. Analysis of factors on time-space effect of internal force and deformation for retaining structure of deep foundation pit under soft soil[J]. China Civil Engineering Journal,2001(5):90.

- [2] 张艳书,薛棚超,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(6):1639.
ZHANG Yanshu, XUE Xuchao, ZHUANG Haiyang, et al. Effects of soft soil layer on the ground settlement of a long-narrow deep excavated foundation pit for subway station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2018(6):1639.
- [3] 何超,陈沛,周顺华. 软土基坑宽度效应对坑底隆起的影响[J]. 华东交通大学学报,2015(6):82.
HE Chao, CHEN Pei, ZHOU Shunhua. Influence of width effect of soft soil excavation on basal heave[J]. Journal of East China Jiaotong University,2015(6):82.
- [4] 王浩,贾敏才,杨修晗. 基坑变形的尺度效应及控制措施研究[J]. 四川建筑科学研究,2016(1):69.
WANG Hao, JIA Mincai, YANG Xiuhuan. Influence of size effect on deformation of foundation pit and control measures[J]. Sichuan Building Science,2016(1):69.
- [5] 庄海洋,张艳书,薛棚超,等. 深软场地地铁狭长深基坑变形特征实测与已有统计结果的对比分析[J]. 岩土力学,2016(增刊2):561.
ZHUANG Haiyang, ZHANG Yanshu, XUE Xuchao, et al. Deformation characteristics of narrow-long deep foundation pit for subway station in soft ground and compared with existing statistical results[J]. Rock and Soil Mechanics,2016(S2):561.
- [6] 王洪新. 基坑宽度对围护结构稳定性的影响[J]. 土木工程学报,2011(6):120.
WANG Hongxin. Influence of excavation width on enclosure-structure stability of foundation pits[J]. China Civil Engineering Journal,2011(6):120.
- [7] 王洪新. 基坑的尺寸效应及考虑开挖宽度的抗隆起稳定安全系数计算方法[J]. 岩土力学,2016(增刊2):433.
WANG Hongxin. Size effect of foundation pits and calculation method of safety factor of heave-resistant stability considering excavation width[J]. Rock and Soil Mechanics,2016(S2):433.
- [8] 王洪新,沈旭凯. 考虑支撑作用的基坑抗隆起稳定安全系数计算方法[J]. 岩土力学,2020(5):1680.
WANG Hongxin, SHEN Xukai. Heave-resistant stability analysis method of foundation pit considering support[J]. Rock and Soil Mechanics,2020(5):1680.

(收稿日期:2020-07-27)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728