



基坑底部土体裙边加固模型试验 与数值模拟研究

熊伟¹, 邓建林², 钟庆华², 徐立明², 徐长节^{1,3}

(1. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室; 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013; 2. 浙江杭海城际铁路有限公司, 浙江 嘉兴 314000; 3. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心; 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 杭州 310058)

摘要:为研究基坑底部土体裙边加固对基坑变形和内力的影响, 分别对未进行坑底加固和采用坑底裙边加固2种工况进行模型试验。在填土过程中预先浇筑加固土体, 实现坑底土体加固。在基坑开挖过程中对地表沉降、冠梁侧向位移、桩身弯矩以及桩后土压力进行监测。用有限元软件Abaqus对模型试验进行拓展, 将基坑变形的计算结果进行极差分析。研究表明, 对坑底土体采用裙边加固, 可以有效地减小支护结构的侧向位移; 坑顶地表沉降虽有减小, 但效果不明显; 桩身弯矩略小于未进行坑底加固的工况; 土体开挖, 桩随着坑底下某一点发生转动, 造成桩上半部分土压力减小, 桩底处土压力增大; 裙边加固尺寸中深度相较于宽度对基坑的变形影响更大; 土体加固深度与宽度超过一定范围, 控制基坑变形的效果有所提高但不明显, 加固深度宜取0.3~0.4倍的开挖深度, 宽度宜取0.35~0.45倍的开挖深度。

关键词: 基坑开挖; 模型试验; 有限元; 裙边加固; 加固范围

中图分类号: TU753 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2019)05-0009-09

A model test and numerical study of skirt border reinforcement in the bottom of the excavation

Xiong Wei¹, Deng Jianlin², Zhong Qinghua², Xu Liming², Xu Changjie^{1,3}

(1. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering; Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P. R. China; 2. Zhejiang Hanghai Intercity Railway Co., Ltd, Jiaying 314000, Zhejiang, P. R. China; 3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering; Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou, 310058, P. R. China)

Abstract: In order to study the effect of skirt soil reinforcement on the deformation and stress of foundation pit, model tests were carried out for cases without bottom reinforcement and skirt reinforcement

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51725802); 国家自然科学基金(51878276); 江西省落地计划成果转化项目(KJLD4036)

作者简介: 熊伟(1993-), 男, 主要从事基坑围护研究, E-mail: 903020201@qq.com.
徐长节(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: 702298056@qq.com.

Received: 2018-09-10

Foundation item: National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 51725802); National Natural Science Foundation of China (No. 51878276); Jiangxi Province Achievement Transformation Program (No. KJLD4036)

Author brief: Xiong Wei (1993-), main research interest: deep foundation pit support, E-mail: 903020201@qq.com.
Xu Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: 702298056@qq.com.

respectively. To realize the reinforcement of bottom soil, the method of reinforcing soil by pre-pouring in the process of filling was adopted. The ground subsidence, the lateral displacement of top beam, the bending moment of piles and the earth pressure are measured during excavation. Extensive FE parametric studies indicate that the skirt reinforcement can effectively reduce the lateral displacement of the supporting structure. Although surrounding settlements decreased, the effect is less obvious. The bending moment of the pile is slightly less than that of the pile without reinforcement. With the excavation, the earth pressure in the upper part of the pile decreases and pressure at the bottom increases as the pile rotates at a certain point under the pit. The depth of skirt reinforcement has greater influence on the deformation of foundation pit than the width of reinforcement. When the depth and width of soil reinforcement exceed a certain range, the effect of controlling the deformation of foundation pit is marginally improved. The reinforcement depth should be 0.3~0.4 times of the excavation depth and the width should be 0.35~0.45 times of the excavation depth.

Keywords: basement excavation; model test; finite element method; skirt border reinforcement; reinforced range

随着基坑规模的扩大,施工环境越来越复杂,为减小基坑开挖对周围环境的影响^[1],因此,对基坑变形的要求也越来越高。基坑工程的变形指标主要有围护结构侧向位移、周围地表沉降和坑底隆起等^[2-4]。如何控制基坑变形,徐长节等^[5]、Yao^[6]、姚燕明等^[7]、Xu等^[8]、康志军等^[9]提出了诸多措施,如调整基坑土体开挖顺序、合理选择施工工艺、坑底加固、增加支护结构刚度等。其中,基坑底部土体加固,在软土地区的基坑工程中十分常见^[10-12]。裙边加固相对于满堂加固、暗墩加固等其他加固形式,“性价比”更高^[13-14],因此,常被用于一些安全等级不高的基坑工程。目前,Broms^[15]、康志军等^[16]、梁鹏宇等^[17]多采用数值计算方法研究基坑变形的影响因素,但方法比较单一。郑俊杰等^[18]、马郎等^[19]认为,当加固深度与宽度相当时,基坑的加固效果最优,但并未给出具体的取值范围。加固宽度与深度这两个因素对基坑变形影响的强弱,也鲜有学者研究。在进行基坑围护结构设计时,仅把土体加固当作一种安全储备手段,不仅没有充分发挥加固土体的力学性能,而且造成了经济上的极大浪费。

本文采用模型试验的方法,研究了坑底土体裙边加固对基坑变形、支护结构内力以及桩后土压力的影响。采用有限元软件 Abaqus 对模型试验进行拓展,研究裙边加固情况下土体的加固尺寸(加固深度与加固宽度)对基坑变形的影响,并确定裙边加固的合理取值范围,为今后的基坑工程提供借鉴。

1 模型试验

1.1 试验部件的参数设计

模型试验模拟了一个开挖深度为 8 m 的矩形基坑,支护结构采用直径为 0.8 m、桩长 16 m 的密排钻孔灌注桩,并在冠梁处用 1 道钢筋混凝土支撑,其截面为 600 mm×600 mm。试验的几何相似常数 $s_1=1/20$ 。根据对称原理,取基坑的一半进行试验。在实际工况中,要满足所有的相似条件十分困难,故在模型试验中,将 EI 、 EA 、 EW 作为复合物理量进行参考^[20]。试验中,水平支撑采用顺纹木板,其弹性模量为 11 GPa,可得 $S_E \approx 1/3$ 。考虑到支撑主要作用为抗压,所以需满足 EA 相似。计算可得截面尺寸为 13 mm×13 mm,长度为 60 cm。支护桩采用 PV 聚乙烯孰料材质,其弹性模量通常为 2.1 GPa,可得 $S_E \approx 1/15$ 。支护桩主要作用为抗弯,所以需满足 EI 相似,计算可得其直径为 37 mm,内径为 35 mm,长度为 80 cm。试验部件参数见表 1。

表 1 试验部件参数

Table 1 Test Component Parameters

部件	尺寸/cm	弹性模量/GPa	材质
基坑	深度 40		
支护桩	直径 3.7、内径 3.5、桩长 80	2.1	PV 聚乙烯孰料
内支撑	截面尺寸 1.3×1.3、长 60	11.0	顺纹木板

1.2 试验土体及加固土体的制备

基坑底部土体加固的措施常见于含水率较大的粘土或者软土地区,故试验采用南昌某工地的粘性土。由于土质较杂,故对土样先进行晾晒,然后进行筛分。

在进行晾晒前,对土体含水率进行测量,为 21%。

土体加固试验中采用化学物质掺入试验土样,或者降低土体含水率,从而提高土体的力学性质,达到土体加固的目的。常见化学物质包括:水玻璃溶液、氯化钙溶液、超细水泥、硅粉与铝粉的混合物或者微生物材料等^[21-22]。试验采用水灰比为 1:1 的超细硅酸盐水泥浆液与试验土体进行混合,超细硅酸盐水泥浆液用量为制备加固土体的试验土样质量的 8%,如图 1 所示。



未添加水泥浆液土样 添加了水泥浆液土样
图 1 试验土样

Fig. 1 The reinforced soil

1.3 试验方法

试验在尺寸为 150 cm×120 cm×150 cm(长×宽×高)的模型箱内进行,如图 2 所示,为了消除边界效应,在模型箱四周涂抹润滑油。首先,将支护结构架设到指定位置,然后,对模型箱进行分层填土并洒水浸润。每次填土高度 15 cm,然后采用平板夯夯实装置,对填土进行夯实,如图 3 所示。为实现坑底加固,采用预先填筑加固土体的方法,填土到一定高度,用隔板隔出加固区域,将制备好的加固土体填入区域并压实,形成加固区,然后继续填土至坑顶。裙边加固范围为 25 cm×20 cm(宽×深)。静置一段时间后对土体进行开挖,土体分 3 层开挖,第 1 层与第 2 层开挖 15 cm,第 3 层开挖 10 cm。为减小开挖过程中扰动的影响,在模型箱一侧设置了出土口,填土过程中,用 3 块木板将出土口挡住,每挖一层土前抽离相应位置的木板,使之从出土口排出。

1.4 试验监测内容

1.4.1 位移监测 采用数显百分表对基坑中间无支撑处的坑顶地表沉降、有支撑处与无支撑处的冠梁侧向位移、支撑下方的桩身弯矩和中间无支撑处的桩后土压力进行监测,百分表的精度为 0.01 mm,如图 4 所示。

1.4.2 弯矩监测 应变片沿着支护桩进行粘贴,在坑底以上,每隔 100 mm 布置一个;坑底以下,每隔



图 2 试验模型箱

Fig. 2 The test model box



图 3 试验土样填筑

Fig. 3 The reinforced soil filled

50 mm 布置一个。由于试验土样含水率较高,所以在应变片表面涂抹了环氧树脂及玻璃胶进行防水处理。将应变片测得的应变根据材料力学中弯矩计算公式进行计算,得到支护结构的弯矩。

1.4.3 土压力监测 微型土压力盒采用云石胶粘贴在支护桩迎土侧,沿着支护桩每隔 100 mm 布置一个,共布置 7 个,如图 4 所示。微型土压力盒的量程为 50 kPa,精度为 0.1%,直径为 1 cm,厚度为 4.2 mm。该土压力盒无需进行防水处理。



图 4 监测装置布置图

Fig. 4 The plan of monitoring devices

2 试验结果分析

2.1 坑顶地表沉降

监测结果如图5所示,地表沉降随着土层的开挖而逐渐增大,随着与冠梁距离的增加,地表沉降先增大后减小。与未进行坑底加固的情况对比,趋势基本一致,最大地表沉降位置相同,相差0.10 mm,最大沉降减小了约6.9%。

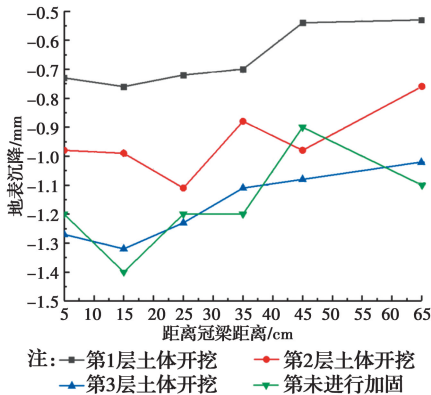


图5 地表沉降监测值

Fig. 5 The monitoring value of the surface settlement

2.2 冠梁侧向位移

冠梁侧向位移如图6所示,冠梁侧向位移随着土层的开挖而增大,但不呈线性关系。有支撑处冠梁与无支撑处冠梁最终侧向位移分别为0.68 mm和0.92 mm。有支撑处冠梁位移增加趋势较无支撑处冠梁更为缓慢。与未进行土体加固的情况进行对比,有支撑处冠梁与无支撑处冠梁侧向位移分别减小了0.32 mm和0.38 mm,侧向位移平均降低了约30%。

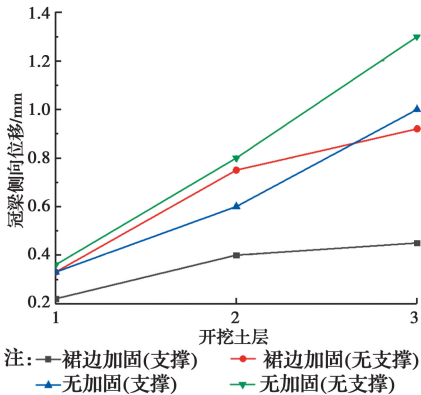


图6 冠梁侧向位移试验值

Fig. 6 The lateral deformation of top beam

2.3 桩身弯矩

裙边加固模型试验同样选取了两根位置对称的支护桩进行弯矩监测,监测结果如图7所示。随着

土体的开挖,支护结构弯矩的绝对值增加,最大正弯矩的位置逐渐下移。第1层土体开挖完成后,支护结构最大正弯矩为0.12 N·m,位于距离桩顶10 cm处;第2层土体开挖完成后,支护结构最大正弯矩为0.59 N·m,位于距离桩顶20 cm处;第3层土体开挖完成后,支护结构最大正弯矩为0.99 N·m,位于距离桩顶30 cm处。与未进行土体加固的情况对比,支护结构最大正弯矩减小了6.6%。

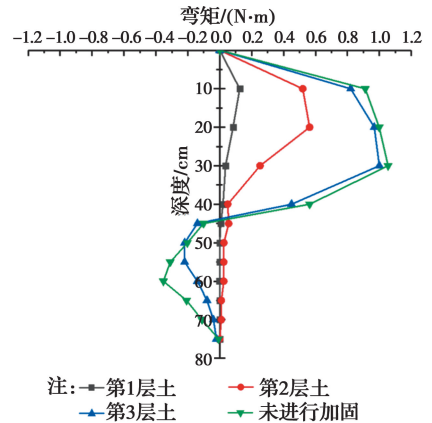


图7 弯矩监测值

Fig. 7 The monitoring value of bending moment

2.4 桩后土压力

试验过程中,距离桩顶10、50、60 cm处的土压力盒的度数明显超过量程,所以剔除这3个土压力盒测得的数据。由图8可知,未开挖前土压力的实测值与静止土压力计算值,在趋势上一致,随着土体的深度增加,土压力逐渐增大。支护结构上半部分的土压力随着土体开挖而减小,原因是土体的开挖造成支护结构向坑内发生侧向位移,支护桩上半部分受到的土压力从静止土压力向主动土压力转变;但是,支护桩底端的土压力却相反,随着土体的开挖而增大,原因是桩底的土压力从静止土压力向被动土压力转化。

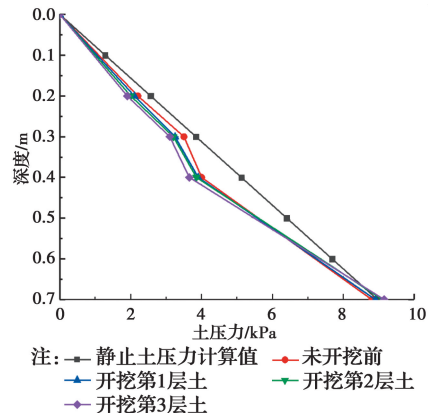


图8 桩后土压力监测值

Fig. 8 The comparison of bending moment

3 数值模拟

3.1 计算模型的建立

模型所有部件尺寸与试验尺寸一致。数值模拟中,对土体四周进行相应方向的约束,来代替模型箱的作用。

试验完成后,对试验土样以及加固土体进行取样,进行简单的土工试验,测得的主要参数见表 2。

土体本构采用剑桥模型,加固土体、冠梁、内支撑以及支护桩简化成弹性体,采用弹性模型。剑桥模型中,3 个关键参数 M 、 λ 、 κ 需要进行固结试验与三轴压缩试验才能确定,由于条件限制,并未进行试验。参照文献[23],选取含水率较接近的武汉地区软土。为保证模型的收敛性,将冠梁与内支撑模型合并成一个部件。桩-土之间的接触采用面-面捆绑接触,并将支护结构面作为主面,模型图如图 9 所示。

表 2 材料参数

Table 2 The material parameters

材料	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	粘聚力/kPa	摩擦角/($^\circ$)	(压缩模量/弹性模量)/MPa	含水率	M	λ	κ
试验土样	1.78	16	28	5	23%	1.9	0.084	0.017
加固土样	1.80	30	38	30	10%			
支护桩	1.70			2.1×10^3				
内支撑	7.80			11×10^3				
冠梁	7.80			11×10^3				

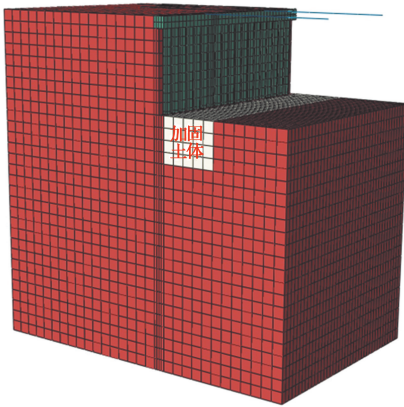


图 9 裙边加固模型

Fig. 9 The model of the skirt border improvement

3.2 计算结果分析

选取冠梁侧向位移与坑顶地表隆起的计算结果和试验结果进行对比,如图 10 所示。冠梁的侧向位移计算值与试验值趋势基本一致;有支撑处与无支撑处冠梁最终结果分别相差了 0.096 mm 和 0.062 mm。地表沉降呈勺字形,在距离冠梁 0~25 cm 内,地表沉降逐渐增加,最大值为 1.185 mm;距离冠梁超过 25 cm 后,地表沉降逐渐减小,在 85 cm 处,地表沉降为 1.02 mm。数值上有所差别,主要原因是试验中土体不均匀且土体开挖过程中仍有一定扰动,但反映规律基本一致,可以认为数值计算对试验的模拟合理。

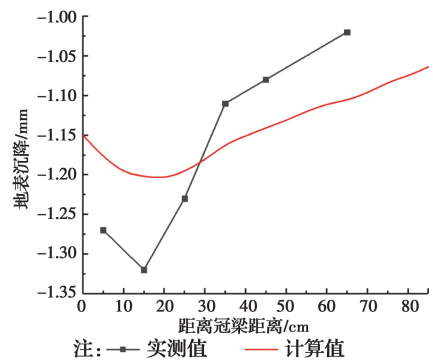
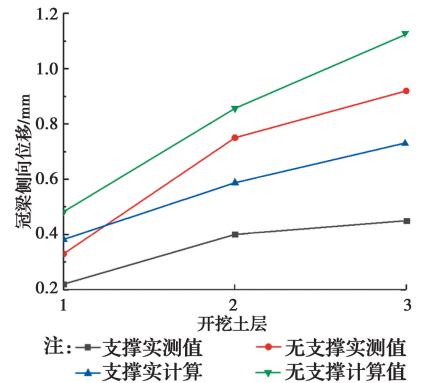


图 10 计算值与监测值对比

Fig. 10 The comparisons between calculated and monitored values

3.3 土体加固尺寸中影响基坑变形的主、次要因素

裙边加固需要考虑土体加固宽度和加固深度,为研究哪个因素对基坑变形的影响更大,分别选取 $0.3H$ 、 $0.4H$ 、 $0.5H$ 的加固深度和 $0.3H$ 、 $0.4H$ 、

0.5H加固深宽(H为开挖深度),进行全组数值模拟,共计9种工况。将支护结构最大侧向位移和坑底最大隆起作为评定指标,进行极差分析。计算结果见表3。

表3 计算结果表
Table 3 Calculation results

序号	影响因素		计算结果	
	加固深度 M	加固宽度 N	支护结构最大侧向位移 y/mm	坑底最大隆起 z/mm
1	0.3H	0.3H	1.051 7	2.591 8
2	0.3H	0.4H	1.054 6	2.587 3
3	0.3H	0.5H	1.034 7	2.584 3
4	0.4H	0.3H	1.040 4	2.594 0
5	0.4H	0.4H	1.026 9	2.590 3
6	0.4H	0.5H	1.020 5	2.586 6
7	0.5H	0.3H	1.031 9	2.596 3
8	0.5H	0.4H	1.018 4	2.593 3
9	0.5H	0.5H	1.012 0	2.589 6

对支护结构侧向位移结果进行详细分析,表4中, $\overline{K_{M1}}$ 、 $\overline{K_{M2}}$ 、 $\overline{K_{M3}}$ 与 $\overline{K_{N1}}$ 、 $\overline{K_{N2}}$ 、 $\overline{K_{N3}}$ 数值均不相等,可知,土体加固深度与宽度对支护结构的变形存在影响。由 $\overline{K_{M1}} < \overline{K_{M2}} < \overline{K_{M3}}$ 可以判断,土体加固深度越大,支护结构的侧向位移越小;由 $\overline{K_{N1}} < \overline{K_{N2}} < \overline{K_{N3}}$ 可以判断,土体加固宽度越大,支护结构的侧向位移越小。同时, $R_M > R_N$,对于支护结构侧向位移,土体的加固深度比加固宽度影响更大。

加固深度与宽度对坑底隆起存在影响。土体加固深度越大、加固宽度越大,基坑坑底隆起越小。 $R_M > R_N$,对于坑底隆起,土体的加固深度比加固宽度影响更大。

综合考虑,加固深度是影响基坑变形的主要因素。为了控制基坑变形,增加土体加固深度比增加加固宽度效果更好。

3.4 土体加固深度基坑变形的影响

由上文可知,加固土体深度越大,基坑变形越小。但实际工程中,土体加固的造价太高,无限制提高土体加固深度,会造成巨大的浪费。为找到合理的加固深度,取土体加固宽度为0.4H,土体加固深度分别为0.2H、0.3H、0.35H、0.4H、0.45H和0.5H共6种工况,建立模型进行计算。

表4 结果分析表

Table 4 The data analysis of results

指标	计算参数	影响因素		
		加固深度 M	加固宽度 N	
支护结构最大侧向位移	K_1	3.141 1	3.124 1	$\Sigma=9.291 5$
	K_2	3.087 9	3.100 0	
	K_3	3.062 4	3.067 4	
	$\overline{K_1}$	1.047 0	1.041 4	
	$\overline{K_2}$	1.029 3	1.033 3	
	$\overline{K_3}$	1.020 8	1.022 5	
	R	0.026 2	0.018 9	
坑底最大隆起	K_1	7.763 4	7.782 1	$\Sigma=23.313 5$
	K_2	7.770 9	7.770 9	
	K_3	7.779 2	7.760 5	
	$\overline{K_1}$	2.587 8	2.590 4	
	$\overline{K_2}$	2.590 3	2.590 3	
	$\overline{K_3}$	2.593 1	2.586 3	
	R	0.005 3	0.004 1	

支护结构最大侧向位移变化如图11所示,0.2H~0.35H之间,曲线斜率最大;0.35H~0.45H之间,曲线斜率次之;0.45H~0.5H之间,曲线斜率最小。这反映了在裙边加固情况下支护结构侧向位移变化与加固深度并不呈线性关系。加固深度为0.2H~0.35H时,抑制支护结构侧向位移效果最明显;加固深度为0.35H~0.45H时,抑制支护结构侧向位移效果逐渐减弱;加固深度为0.45H~0.5H时,支护结构侧向位移变化不大。

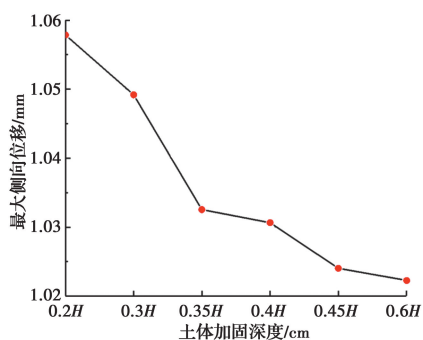


图11 不同加固深度下支护结构最大侧向位移

Fig. 11 The max lateral displacement under different reinforcement depths

坑底隆起计算结果如图12所示,加固宽度一定,随着土体加固深度的增加,坑底最大隆起变化较小。在距离桩超过35cm后,不同加固深度工况下,坑底隆起曲线几乎重合;在距离桩35cm以内,坑底隆起曲线差异明显。土体加固宽度为16cm时,在

土体加固范围内,随着土体加固深度的增加,坑底隆起逐渐减小。

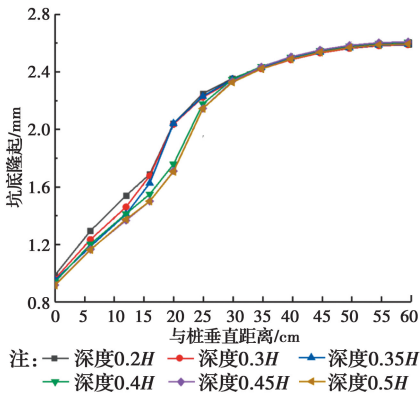


图 12 不同加固深度下坑底隆起

Fig. 12 The soil anti-heave under different reinforcement depths

综合考虑加固深度对支护结构的侧向位移及坑底隆起影响,裙边加固情况下,土体加固深度宜取基坑开挖深度的 0.35~0.4 倍。

3.5 土体加固宽度对基坑变形的影响

为研究裙边加固合理的加固宽度,取土体加固深度为 $0.4H$,土体加固宽度分别为 $0.3H$ 、 $0.35H$ 、 $0.4H$ 、 $0.45H$ 和 $0.5H$ 共 5 种工况进行计算。

支护结构侧向位移计算结果如图 13 所示。随着土体加固深度的改变,支护结构的侧向位移略微减小,变化不大。同时,支护结构最大侧向位移均为与距离桩顶 15 cm 处。

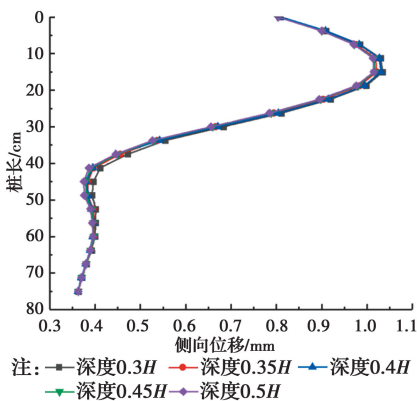


图 13 不同加固宽度下支护结构侧向位移

Fig. 13 The lateral displacement under different reinforcement widths

坑底隆起的计算结果如图 14 所示。在与桩垂直距离超过 35 cm 后,坑底隆起曲线基本重合。坑底隆起最大值位于基坑中间位置,基本没有变化。在与桩垂直距离 0~35 cm,坑底隆起曲线差异明

显,土体加固宽度越大,坑底隆起越小。

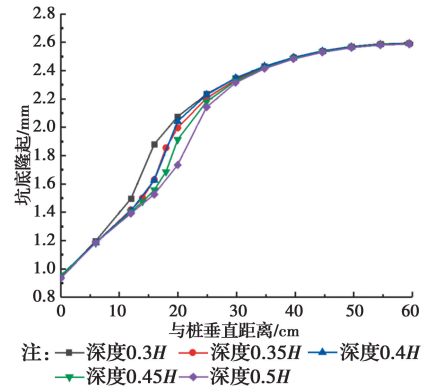


图 14 不同加固深度下坑底隆起

Fig. 14 the soil anti-heave under different reinforcement widths

在 5 种不同土体加固宽度工况下,通过基坑变形对比可知,土体加固宽度对控制基坑变形有一定的作用,加固宽度超过 $0.3H$ 时,坑底最大隆起变化不大。

4 结论

通过模型试验和数值模拟相结合,对基坑底部土体裙边加固后基坑的变形与受力进行研究,得到以下结论:

1) 基坑底部土体裙边加固可以有效减小支护结构的侧向位移;但对减小坑顶地表沉降效果不明显;桩身弯矩也有所减小,但不明显。

2) 在土体开挖过程中,支护桩随坑底某一点发生转动,造成桩后土压力发生不同程度变化。

3) 裙边加固中,土体的加固深度相较于加固宽度对基坑变形影响更大,通过增加土体的加固深度来减小基坑变形效果更好。

4) 坑底土体裙边加固情况下,加固深度与宽度超过一定范围后,加固效果没有明显提升。在含水率为 20% 左右的粘土中,加固深度宜取 $0.3\sim 0.4$ 倍的开挖深度,加固宽度宜取 $0.35\sim 0.45$ 倍的开挖深度。

参考文献:

- [1] ZHANG H B, CHEN J J, ZHAO X S, et al. Displacement performance and simple prediction for deep excavations supported by contiguous bored pile walls in soft clay [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2015, 28(6): A4014008.

- [2] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics [M]. HOBOKEN N J, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1943. doi:10.1002/9780470172766.
- [3] TERZAGHI K, PECK R B. Soil mechanics in engineering practice [M]. J. Wiley, 1948.
- [4] BJERRUM L, EIDE O. Stability of strutted excavations in clay[J]. Géotechnique, 1956, 6(1): 32-47.
- [5] 徐长节, 李庆金. 支护参数对复合支护基坑变形的影响分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 295-298.
XU C J, LI Q J. Study of effect of supporting parameters on deformation behavior of excavation with composite supporting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 295-298. (in Chinese)
- [6] YAO J T. Concept of structural control [J]. ASCE Journal of the Structural Division, 1972, 98 (7): 1567-1574.
- [7] 姚燕明, 周顺华, 孙巍, 等. 支撑刚度及预加轴力对基坑变形和内力的影响 [J]. 地下空间与工程学报, 2003, 23(4):401-404.
YAO Y M, ZHOU S H, SUN W, et al. Influence of brace stiffness and pre-axial force on the deformation and internal force of foundation pit [J]. Under ground Space, 2003, 23(4):401-404. (in Chinese)
- [8] XU C J, CHEN Q Z, WANG Y L, et al. Dynamic deformation control of retaining structures of a deep excavation [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30(4): 04015071.
- [9] 康志军, 黄润秋, 卫彬, 等. 上海软土地区某逆作法地铁深基坑变形[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(8): 1527-1536.
KANG Z J, HUANG R Q, WEI B, et al. Deformation behaviors of deep top-down metro excavation in Shanghai soft clay[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(8): 1527-1536. (in Chinese)
- [10] 许军平. 软土地区深基坑坑内土体竖向加固形式研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
XU J P. Study on different forms of vertical reinforcement in deep excavated pit in soft-clay area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [11] 雷崇. 杭州地区坑底软弱土对基坑变形的影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LEI C. Effect of Hangzhou soft-clay on deformation of foundation pit [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [12] SHIRLAW J N. Jet grouting soft clays for tunnelling and deep excavations: design and construction issues [C]//Third International Conference on Grouting and Ground Treatment, February 10-12, 2003, New Orleans, Louisiana, USA, 2003.
- [13] 熊春宝, 高鹏, 田力耘, 等. 不同坑底加固方式对深基坑变形影响的研究 [J]. 建筑技术, 2015, 46(6): 486-490.
XIONG C B, GAO P, TIAN L Y, et al. Study on influence of different ways of pit bottom reinforcement on deformation of deep foundation pit [J]. Architecture Technology, 2015, 46(6): 486-490. (in Chinese)
- [14] 高鹏. 不同加固方式对深基坑变形影响的数值分析 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
GAO P. Numerical analysis of effects of different ways of reinforcements on deformations of deep foundation pit [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [15] BROMS B B. Design and construction of anchored and strutted sheet pile walls in soft clay [C]//Second International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, June 1-5, 1988.
- [16] 康志军, 谭勇, 邓刚, 等. 被动区土体加固对深基坑变形影响的研究 [J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 119-123.
KANG Z J, TAN Y, DENG G, et al. Impact of soil reinforcement in passive zone on the deformation behaviors of deep excavation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 119-123. (in Chinese)
- [17] 梁鹏宇. 坑内土体加固对软土基坑变形的影响分析 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
LIANG P Y. Effect of soil improvement on deformation of foundation pit in soft-clay area [D]. Changsha: Hunan University, 2013. (in Chinese)
- [18] 郑俊杰, 章荣军, 丁烈云, 等. 基坑被动区加固的位移控制效果及参数分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 29(5):1042-1051.
ZHENG J J, ZHANG R J, DING L Y, et al. Displacement control effects and parameter analysis of passive zone improvement of foundation pits [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 29(5):1042-1051.

- [19] 马郎, 屈若枫, 周兴涛, 等. 基坑被动区加固参数对支护结构位移影响分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(Sup1): 190-196.
MA Y, QU R F, ZHOU X T, et al. Effects of reinforcement parameters in passive zone of excavations on lateral deformation of supporting structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(Sup1): 190-196. (in Chinese)
- [20] 董洁. 有限宽度基坑内支撑+排桩支护结构室内土工模型试验及数值分析[D]. 太原: 中北大学, 2016.
DONG J. The geotechnical structure model test and numerical analysis of deep foundation inner supporting and pit supporting pile within the limited width[D]. Taiyuan: North University of China, 2016. (in Chinese)
- [21] MUJAH D, SHAHIN M A, CHENG L. State-of-the-art review of biocementation by microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization[J]. Geomicrobiology Journal, 2017, 34(6): 524-537.
- [22] 钱春香, 王安辉, 王欣, 等. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1537-1548.
QIAN C X, WANG A H, WANG X, et al. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese)
- [23] 周葆春, 王靖涛, 杨晓东, 等. 武汉粘土修正剑桥模型参数研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(3): 103-107.
ZHOU B C, WANG J T, YANG X D, et al. Research on parameters of modified cam clay for Wuhan clay [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(3): 103-107. (in Chinese)

(编辑 邓云)

期刊更名启事

经国家新闻出版署批准,《土木建筑与环境工程》更名为《土木与环境工程学报(中英文)》。《土木与环境工程学报(中英文)》国内统一连续出版物号为 CN50-1218/TU,文种为中英文,主管单位为教育部,主办单位为重庆大学,出版单位为《土木与环境工程学报(中英文)》编辑部(重庆大学内设机构)。《土木与环境工程学报(中英文)》的办刊宗旨:刊载国内外土木工程、环境科学与工程等领域最新研究成果,促进学术交流,培育高级人才,推动相关学科的繁荣发展。

期刊自 2019 年第 1 期正式启用新刊名《土木与环境工程学报(中英文)》,同时停用刊名《土木建筑与环境工程》。

《土木与环境工程学报(中英文)》编辑部
2019 年 2 月 20 日