

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.167

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基坑底部土体满堂加固模型 试验与数值模拟研究

谈亦帆¹, 言建标², 熊伟¹, 蒋亚龙¹, 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, 杭州 310058)

摘要:为探究基坑底部土体满堂加固对基坑变形和内力的影响,采用室内模型试验方法,研究了基坑底部土体满堂加固对基坑周围地表沉降、冠梁侧向位移、桩身弯矩以及桩后土压力变化的影响。运用 ABAQUS 有限元软件对模型试验进行数值模拟,将试验数据与数值计算结果进行对比,并分析了加固土体的水泥掺入比和加固深度对基坑变形的影响。结果表明:满堂加固对降低基坑底部隆起效果最为明显,对降低支护结构侧向位移较为明显,对减小地表沉降不明显;通过极差分析法得出,增加加固土体的弹性模量较增加加固深度对抑制支护桩侧向位移及坑底隆起更为有效;当水泥掺入比超过一定范围后,加固效果没有显著提升,建议在含水率为 20% 左右的软弱土层地区,水泥掺入比一般为 5%~20%;土体的加固深度超过一定范围后,控制基坑变形的效果有所提高,但不明显,建议土体加固深度取 0.4~0.45 倍基坑深度。

关键词:基坑;满堂加固;模型试验;有限元

中图分类号:TU753.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)02-0056-09

Model test and numerical simulation study of reinforcement of entire basal soil in the bottom of foundation pit

Tan Yifan¹, Yan Jianbiao², Xiong Wei¹, Jiang Yalong¹, 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., Jiaxing 314000, Zhejiang, P. R. China;

3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, P. R. China)

Abstract: In order to study the effect of reinforcement of entire basal soil on the deformation and stress of foundation pit, the effect of the reinforcement of entire basal soil at the bottom of foundation pit on the ground surface settlement, the lateral displacement of top beam, the bending moment of pile and the earth pressure behind pile was studied by laboratory model test. The ABAQUS finite element software was used

收稿日期:2019-08-30

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

作者简介:谈亦帆(1997-),男,主要从事岩土工程研究, E-mail: 452515225@qq.com.

徐长节(通信作者),男,教授,博士生导师, Email: 702298056@qq.com.

Received:2019-08-30

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51725802, 51878276); Jiangxi Province Achievement Transformation Program (No. KJLD4036)

Author brief: Tan Yifan (1997-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: 452515225@qq.com.

Xu Changjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: 702298056@qq.com.

to simulate the model test and the experimental data were compared with the numerical results. The effects of cement-mixed ratio and reinforcement depth on the deformation of foundation pit were analyzed. The results show that the effect of reinforcement of entire basal soil is the most obvious to reduce the bottom heave, the lateral displacement of retaining structure is more obvious, and the ground surface settlement is not obvious. The range analysis method shows that increasing the elastic modulus of reinforced soil is more effective than increasing the reinforcement depth to restrain the lateral displacement of supporting pile and the soil heave of foundation pit. When the cement-mixed ratio exceeds a certain range, the reinforcement effect is not significantly improved. It is suggested that the cement-mixed ratio is generally 5%~20% in the soft soil area with 20% water content. When the soil reinforcement depth exceeds a certain range, the effect of controlling the deformation of foundation pit is improved but not obvious. It is suggested that the soil reinforcement depth should be 0.4~0.45 times the depth of foundation pit.

Keywords: foundation pit; reinforcement of entire basal soil; model test; finite element method

随着城市化发展越来越快,地下空间利用率随之变大,基坑开挖的规模越来越大,对周边环境安全影响也越来越大,特别在一些软土地区(杭州、上海等)进行开挖的基坑,基坑的支护结构往往满足不了强度和变形的要求。在一些软土地区进行的复杂地下工程,仅依靠支护结构和支撑来控制基坑的变形是不可靠的。因此,基坑底部土体加固技术越来越重要^[1]。

许多学者对坑底土体加固问题做了相关性研究。坑底土体加固方法可以分为:注浆加固法、高压旋喷加固法和水泥土搅拌加固法等。其中,注浆加固最早应用于水利工程,用于加固堵漏^[2-3]。Yun等^[4]选用砂土模拟基坑开挖,研究了支护结构粗糙程度对支护结构变形以及坑顶地表沉降的影响;Bolton等^[5]通过基坑模型试验,模拟了地下连续墙失稳前的工作机理,分析了基坑开挖过程中孔隙水压力的变化规律;康志军等^[6]、梁鹏宇^[7]建立有限元模型进行数值模拟,得出满堂加固对基坑的变形控制作用十分明显;侯新宇等^[8]以苏州地铁某车站深基坑开挖为背景进行数值模拟,研究了不同压缩模量加固土体对基坑被动区变形的影响;高鹏^[9]、熊春宝等^[10]分析了不同加固方式对深基坑变形的影响;徐长节等^[11]、陈昆等^[12]研究了基坑开挖对周边土体沉降的影响;赵春彦等^[13]通过水泥土直剪试验、正交试验以及无侧限抗压强度试验,探讨了土体含水率、水泥掺入比和养护龄期对水泥土强度的影响规律。

然而,上述研究并未探究坑底满堂加固下,加固土体深度与加固土弹性模量这两个因素对基坑变形影响的强弱及水泥掺入比对基坑变形的影响。笔者

采用室内模型试验,研究了坑底土体满堂加固对基坑变形、支护结构内力以及桩后土压力的影响。采用ABAQUS有限元软件,对模型试验进行拓展,研究满堂加固下加固土深度与弹性模量对基坑变形的影响及水泥掺入比对基坑变形的影响,并确定了满堂加固合理的加固深度及水泥掺入比。

1 室内模型试验

1.1 模型试验设计

1.1.1 模型试验原型 模型试验模拟了一个开挖深度为8 m的矩形基坑,支护结构采用桩长16 m、直径0.8 m的密排钻孔灌注桩,并在冠梁处设置一道钢筋混凝土支撑,其截面尺寸为600 mm×600 mm。

1.1.2 试验目的和内容 模型试验模拟基坑底部满堂加固和未进行坑底加固工况。采用微型土压力盒、百分表、应变片对桩后土压力、冠梁侧向位移、地表沉降及桩身弯矩进行监测,研究坑底土体满堂加固对基坑变形、支护结构受力以及桩后土压力变化的影响。

1.1.3 试验装置 试验装置包括模型箱、冠梁、内支撑、支护桩、土压力盒、应变片及数显百分表。

1)模型箱的设计与制作 模型试验模拟的是矩形基坑开挖,基坑开挖深度40 cm、宽度120 cm,试验的几何相似常数 $S_1=1/20$ 。在实际中,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考虑^[14]。又根据对称原则,开挖深度不变,开挖宽度取原宽度的一半,为60 cm,由此确定模型箱的尺寸为150 cm×120 cm×150 cm(长×宽×高)。如图1所示,模型箱留有一个120 cm×

40 cm(宽×高)的出土口并用3块可拆卸的木板挡住,从下往上,3块木板的高度分别为15、15、10 cm。填土时,将3块木板放置在出土口,防止土体流失;开挖时,分3次开挖,每挖一层土前抽离相应位置的木板,以便土体排出。



图1 模型箱

Fig. 1 Test model box

2) 支护桩、冠梁及支撑材料 试验过程中,水平支撑采用顺纹木板,其弹性模量为11 GPa,可得 $S_E=1/3$ 。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。支护结构采用支护桩密排的形式,材料选用PV 聚氯乙烯塑料,如图2所示,其弹性模量为2.1 GPa,可得 $S_E=1/15$ 。考虑其主要作用为抗压,所以,需满足 EI 相似,计算可得直径为37 mm、内径为35 mm,长度为80 cm。冠梁材料选用木板,尺寸为120 cm×10 cm×5 cm(长×宽×高),沿冠梁长边方向等距离制作深20 mm的凹槽,平面尺寸与支护桩尺寸相同,起固定支护桩作用。

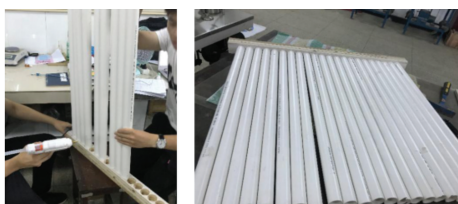


图2 支护结构

Fig. 2 The retaining structure

3) 传感器的布置 应变片沿着支护桩模型进行粘贴,坑底以上,每隔100 mm布置1个;坑底以下,每隔50 mm布置1个。用502胶水将应变片粘贴到支护桩相应的位置,然后,在焊接好的应变片表面涂一层玻璃胶,待玻璃胶干了后,再涂一层环氧树脂,确保应变片不会因为浸水发生破坏。

微型土压力盒粘贴在支护桩模型迎土侧,每隔100 mm粘贴1个,采用云石胶进行粘贴,共布置7个土压力盒,如图3所示。

数显百分表架设在坑外地表和冠梁上,共8个。如图4所示,地表上的数显百分表距冠梁5、15、25、

35、45、65 cm处进行布置,冠梁上的数显百分表1个放在中间无水平支撑处,1个放在有水平支撑处。架设数显百分表时,用大头针固定出相应的位置,减小误差。

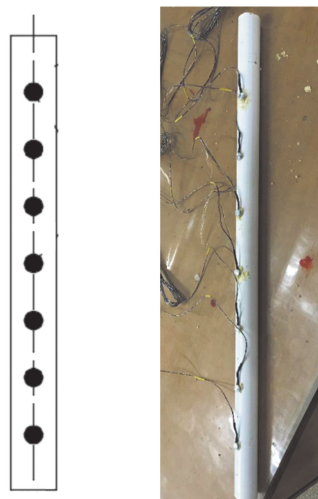


图3 微型土压力盒

Fig. 3 Miniature earth pressure cells



图4 百分表布置图

Fig. 4 The dial indicator

1.1.4 试验土体及加固土体 基坑底部土体加固的措施常出现在软弱土层地区,故试验土体选用南昌某工地的黏性土,以保证试验的真实性。由于土质较杂,需对土样先晾晒后筛分。在进行晾晒前,测得土体含水率为21%。

土体加固试验中常往试验土样掺入一些化学物质,提高其力学特性,从而达到土体加固的目的^[15-16]。试验加固土体选择往试验土样中混入水灰比1:1的超细硅酸盐水泥浆液,该浆液混入量取试验土样质量的8%。

1.2 试验过程

填土前,在模型箱周围涂上一层润滑油,消除边

界效应。将 PVC 管与冠梁用热熔胶连接成一个整体,摆放到预定位置后,采用分层填土及洒水的方式,将试验土样填入模型箱的一定高度,再刮平土体表面。坑底加固时,采用预先填筑加固土体的方法,填土到一定高度,将提前制备好的加固土体填入箱内,加固深度取 16 cm(约 0.4 倍开挖深度),直到基坑底面高度,形成加固区,然后继续填土至坑顶。静置一段时间后,对土体进行分层开挖,第 1 层土与第 2 层土开挖 15 cm,第 3 层土开挖 10 cm。

2 试验结果与分析

2.1 坑顶地表沉降

监测结果如图 5 所示,随着土层的开挖,地表沉降逐渐增大;随着与冠梁距离的增加,地表沉降先增后减。与未进行加固的工况对比,坑顶沉降略小于未加固工况,最大地表沉降位置基本相同,最大地表沉降减小约 8.3%。

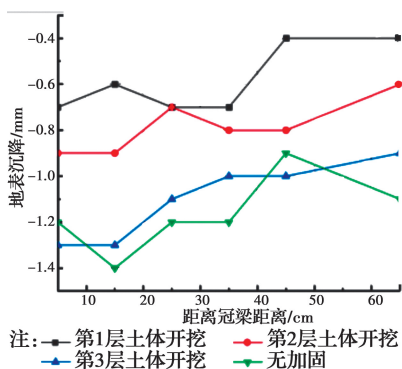


图 5 地表沉降监测值

Fig. 5 The monitoring value of the surface settlement

2.2 冠梁侧向位移

试验中,选取有支撑与无支撑两个点的位置进行监测。X 轴为土层开挖层数,Y 轴为冠梁侧向位移,取坑内方向为正。如图 6 所示,随着土层的开挖,侧向位移都逐渐增大,满堂加固后的冠梁侧向位移都小于未进行加固工况的侧向位移。满堂加固后有支撑处冠梁与无支撑处冠梁最终侧向位移分别为 0.45、0.66 mm。与未进行土体加固的工况进行对比,有支撑处冠梁与无支撑处冠梁侧向位移分别减小了 0.37、0.45 mm,冠梁侧向位移平均降低了约 42%,说明坑底满堂加固控制基坑支护结构侧向位移效果较为明显。

2.3 支护桩桩身弯矩

模型试验选取两根位置对称的支护桩进行弯矩

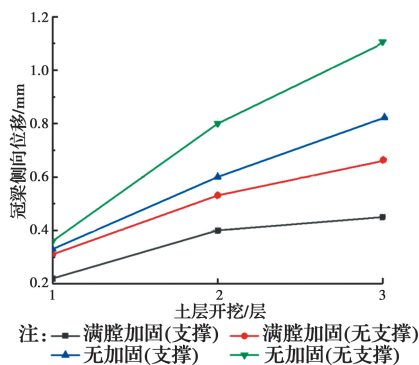


图 6 冠梁侧向位移监测值

Fig. 6 The monitoring value of the lateral displacement of top beam

监测并取其测量值的平均值,结果如图 7 所示。基坑底面以上都是正弯矩,底面以下逐渐出现负弯矩,第 1 层土体开挖完后,支护结构的弯矩很小,最大正弯矩为 $0.13 \text{ N} \cdot \text{m}$,距离桩顶 10 cm 位置处;第 2 层土体开挖完后,支护结构最大正弯矩为 $0.59 \text{ N} \cdot \text{m}$,距离桩顶 20 cm 位置处;第 3 层土体开挖完后,支护结构最大正弯矩为 $0.94 \text{ N} \cdot \text{m}$,距离桩顶 30 cm 位置处。随着土层的开挖,支护结构的最大正弯矩逐渐增大,最大正弯矩的出现位置逐渐下移,但都处于基坑底面以上。满堂加固与未进行土体加固的工况对比,支护结构的正弯矩与负弯矩均小于未进行土体加固工况下的支护结构弯矩,最大正弯矩减小了 11.3%,两者位置基本相同。

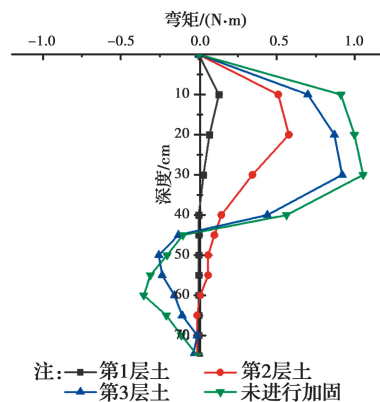


图 7 弯矩监测值

Fig. 7 The monitoring value of bending moment

2.4 桩后土压力

实验过程中,由于土样是含水率较大的土样,同时,微型土压力盒比较精密,出现了土压力盒损坏情况,排除损坏土压力盒的读数,结果如图 8 所示。虚线为静止土压力计算值,土压力的实测值没有与土体深度呈线性关系,可能是因为土体的不均匀造成的。随着土体开挖深度的增加,土压力实测值没有

太大的变化,但在支护结构上半部分,土压力实测值随着土体开挖略有减小,原因是随着基坑开挖深度的增加,支护桩向基坑内侧的位移增加,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造成的;而支护桩底端的土压力变化却相反,原因是随着土体的开挖,支护桩绕着坑底以下某点发生了转动,土压力逐渐增大,桩底的土压力从静止土压力转化为主动土压力。

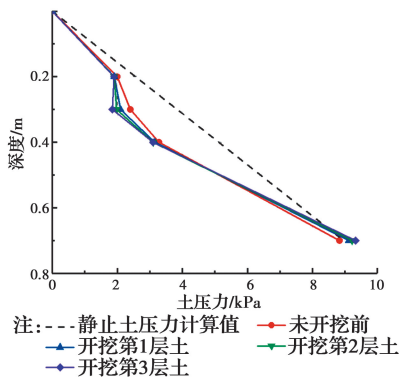


图8 桩后土压力监测值

Fig. 8 The monitoring value of earth pressure behind pile

3 数值模拟

3.1 有限元模型建立

选用 ABAQUS 有限元软件进行数值分析,模型尺寸与试验箱尺寸相同,即长、宽、高分别为 150、120、150 cm。数值模拟中,对土体四周进行相应方

向的约束,以代替模型箱的作用。

土体的本构模型选用修正剑桥模型,模型参数见表 1。其中,剑桥模型中 M 、 λ 、 κ 等 3 个参数借鉴已有文献^[17]进行取值。冠梁、内支撑以及支护桩采用弹性模型,桩土之间采用摩擦接触,摩擦系数根据经验取得,内支撑与冠梁通过冠梁上的凹槽搭接连接起来,为了符合实际情况,将冠梁与内支撑设置为一个部件,数值模拟物理参数与试验模型材料参数一致。

3.2 计算结果分析

1) 冠梁侧向位移与地表沉降 选取有支撑与无支撑处的冠梁进行分析,并与实测值进行对比,如图 9 所示。随着基坑开挖层数的增加,冠梁的侧向位移逐渐增加,支撑处的冠梁侧向位移小于无支撑处

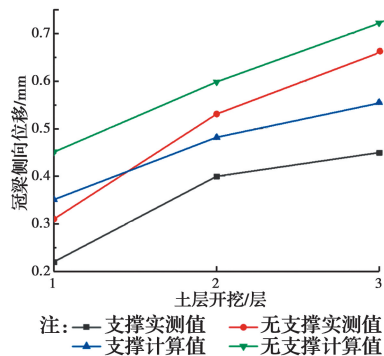


图9 冠梁侧向位移图

Fig. 9 The diagram of lateral displacement of the top beam

表 1 材料参数

Table 1 The material parameters

材料	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	泊松比	弹性模量/GPa	含水率/%	M	λ	κ
试验黏土	16	28	0.35	5.0	23	1.9	0.084	0.017
加固土	30	38	0.35	56.5	10			
支护桩			0.30	2.1×10^3				
水平支撑			0.30	11.0×10^3				
冠梁			0.30	11.0×10^3				

的冠梁侧向位移。与试验值进行对比,侧向位移的整体趋势基本一致,最终结果分别相差了 0.09、0.06 mm,差别可以忽略不计。坑顶地表沉降选取坑顶中间地表进行分析,结果如图 10 所示。计算值呈“勺子”型,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。与实测值进行对比,计算结果与实测结果趋势大致

一致,沉降最大值相差约 0.1 mm,可以认为数值计算对试验的模拟合理。

2) 支护桩侧向位移 基坑围护中,支护桩的侧向位移是关注的重点,为此,选取两根桩进行分析,有支撑处的 1# 桩位于 1/3 长度冠梁位置处,无支撑处的 2# 桩位于正中间,结果如图 11 所示。位于支撑下方的支护桩受到支撑的限制,侧向位移均小于无支撑下方的支护桩的侧向位移。随着土体的开

挖,支护桩侧向位移逐渐增大,且最大位移位置随着土体开挖逐渐下移,在基坑面以上的支护桩侧向位移较大,而基坑开挖面以下,支护桩的侧向位移较小。1#支护桩的侧向位移小于2#支护桩的侧向位移。1#支护桩最大侧向位移为0.68 mm,距离桩顶11.3 cm位置处;2#支护桩最大侧向位移为0.892 mm,距离桩顶15 cm位置处。

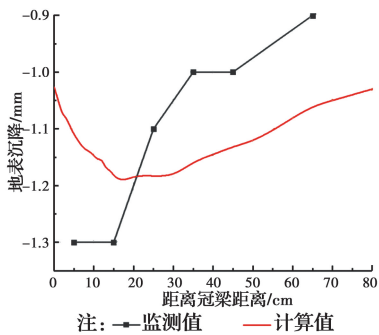


图 10 地表沉降对比

Fig. 10 The comparison of surface settlement

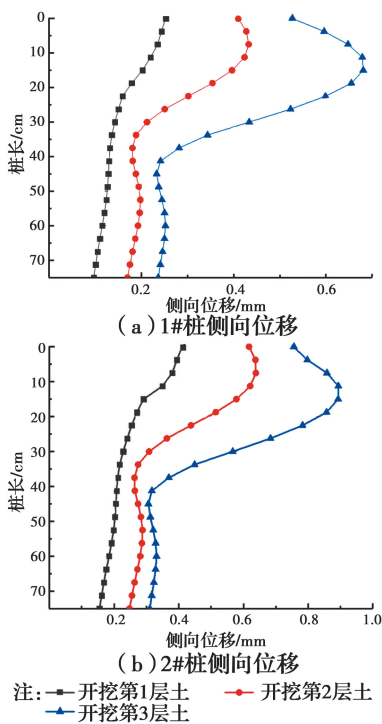


图 11 支护桩侧向位移

Fig. 11 The lateral displacement of the retaining structure

3)坑底隆起 在数值模拟中,选取基坑中心位置进行分析,距离桩的垂直距离为 X 轴,坑底隆起方向为 Y 轴正方向,如图 12 所示。坑底隆起呈开口向下的抛物线形,基坑隆起最大值位于基坑中间部位,随着土体的开挖,坑底隆起逐渐增加。开挖完成后,满堂加固下坑底最大值为 2.12 mm,未进行土体加固的

坑底隆起最大值为 2.70 mm,两者相差0.58 mm,土体满堂加固使坑底隆起最大值减小了 21%。

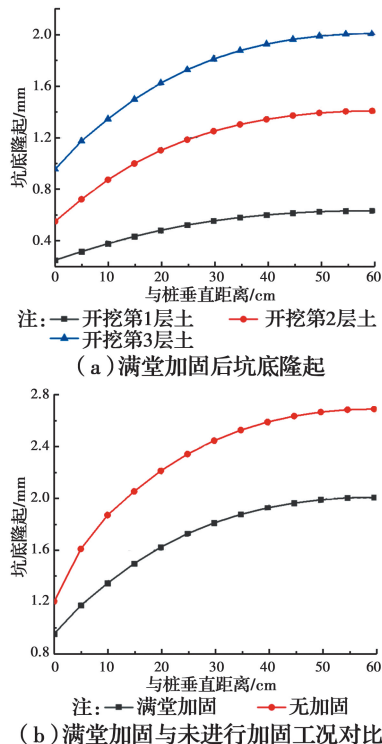


图 12 坑底隆起曲线

Fig. 12 The Bottom heave curves

3.3 加固深度和弹性模量对基坑变形的影响

满堂加固需要考虑土体加固深度与弹性模量哪个因素对基坑变形的影响更大。为此,选取 $1.2E$ 、 $1.4E$ 、 $1.6E$ (E 为加固土初始弹性模量) 和 $0.3H$ 、 $0.4H$ 、 $0.5H$ 加固宽度 (H 为开挖深度) 进行组合,共 9 种工况,然后进行数值模拟。根据这 9 种工况,再对支护桩最大侧向位移与坑底最大隆起结果采用极差分析法,研究弹性模量和加固深度这两个因素中哪个因素对于基坑变形的影响较大。

极差分析法分为计算和分析步骤,其中, K_{jm} 表示第 j 因素 m 水平所对应的计算结果之和, $\overline{K_{jm}}$ 表示第 j 因素 m 水平所对应的计算结果之和的平均值,通过 K_{jm} 可以判断 j 因素的优水平和各个因素的水平组合, R_j 为 j 列因素的极差, $R_j = \max(\overline{K_{j1}}, \overline{K_{j2}}, \dots, \overline{K_{jm}}) - \min(\overline{K_{j1}}, \overline{K_{j2}}, \dots, \overline{K_{jm}})$, R_j 反映了 j 列因素的水平变动时试验指标的变动幅度, R_j 越大,则说明该因素对指标的影响越大,因此,可以判定因素的主次。

利用 ABAQUS 有限元软件进行数值模拟,计算结果如表 2 所示,计算结果分析如表 3 所示。对

支护桩侧向位移进行分析,表中 $\overline{K_{M1}}$ 、 $\overline{K_{M2}}$ 、 $\overline{K_{M3}}$ 和 $\overline{K_{N1}}$ 、 $\overline{K_{N2}}$ 、 $\overline{K_{N3}}$ 分别反映加固深度与加固土弹性模量对支护结构的影响。通过 $\overline{K_{M1}} > \overline{K_{M2}} > \overline{K_{M3}}$ 可以判断,随着土体加固深度增大,支护桩侧向位移越小;通过 $\overline{K_{N1}} > \overline{K_{N2}} > \overline{K_{N3}}$ 可以判断,随着加固土的弹性模量增大,支护桩侧向位移越小。根据极差分析法公式得出 $R_N > R_M$,可以认为对于支护结构侧向位移,加固土的弹性模量要比加固土深度影响更大。对坑底最大隆起进行分析,表中 $\overline{K_{M1}}$ 、 $\overline{K_{M2}}$ 、 $\overline{K_{M3}}$ 和 $\overline{K_{N1}}$ 、 $\overline{K_{N2}}$ 、 $\overline{K_{N3}}$ 分别反映加固深度与加固土弹性模量对坑底隆起的影响。通过 $\overline{K_{M1}} > \overline{K_{M2}} > \overline{K_{M3}}$ 可以判断,随着加固土弹性模量增大,基坑坑底隆起量越小。根据极差分析法公式得出 $R_N > R_M$,可以认为对于基坑坑底隆起值,加固土的弹性模量要比加固土深度影响更大。

表 2 计算结果

Table 2 computational results

序号	因素		计算结果	
	加固深度 M	弹性模量 N	支护结构最大侧向位移/mm	坑底最大隆起/mm
1	0.3H	1.2E	0.859 2	2.037 5
2	0.3H	1.4E	0.841 2	2.011 6
3	0.3H	1.6E	0.829 2	1.992 5
4	0.4H	1.2E	0.855 6	2.028 3
5	0.4H	1.4E	0.838 4	2.005 0
6	0.4H	1.6E	0.827 6	1.988 3
7	0.5H	1.2E	0.852 8	2.023 3
8	0.5H	1.4E	0.835 6	2.001 6
9	0.5H	1.6E	0.821 6	1.980 8

表 3 计算结果分析

Table 3 Analysis of calculation results

分析对象	参数	影响基坑变形因素	
		加固深度 M	弹性模量 N
支护桩最大侧向位移	K_1	2.529 6	2.567 6
	K_2	2.521 6	2.515 2
	K_3	2.510 0	2.478 4
	$\overline{K_1}$	0.843 2	0.855 8
	$\overline{K_2}$	0.840 5	0.838 4
	$\overline{K_3}$	0.836 6	0.826 1
	R	0.006 6	0.029 7

续表 3

分析对象	参数	影响基坑变形因素	
		加固深度 M	弹性模量 N
坑底最大隆起	K_1	6.041 6	6.089 1
	K_2	6.021 6	6.018 2
	K_3	6.005 7	5.961 6
	$\overline{K_1}$	2.013 8	2.029 7
	$\overline{K_2}$	2.007 2	2.006 0
	$\overline{K_3}$	2.001 9	1.987 2
	R	0.011 9	0.042 5

通过极差分析法得出加固土弹性模量对支护桩及坑底隆起影响更大,加固土弹性模量是影响基坑变形的主要因素,加固深度是次要因素。

3.3.1 满堂加固下不同水泥掺入比对基坑变形的影响 水泥掺入比的不同会直接影响加固土的力学特性,从而影响控制基坑变形的效果。采用割线模量(E_{50})作为加固土的弹性模量,根据贾坚^[18]在三轴仪(无围压)得出水泥土变形模量与抗压强度 q_u 的关系式 $E_{50} = (60 \sim 154)q_u$,以及对室内水泥土试验结果拟合的曲线公式 $q_u = 0.766 9 \times 1.08^a$ (a 为水泥掺入比),求得水泥土弹性模量与水泥掺入比的关系式 $E_{50} = 30.528 \times 1.08^a$ (选用 $E_{50} = 60q_u$)。另外,设定5%、10%、15%、20%、25%、30%这6种不同水泥掺入比与未进行土体加固情况下对比,探究水泥掺入比对基坑变形的影响。

利用ABAQUS有限元软件对6种不同工况进行数值模拟,如表4所示,计算结果如图13所示。随着水泥掺入比的增加,支护桩最大侧向位移和坑底最大隆起逐渐减小,但水泥掺入比超过20%后,支护桩最大侧向位移和坑底最大隆起减小效果并不明显。当水泥掺入比为20%后,支护桩最大侧向位移和坑底最大隆起分别为0.786、1.909 mm,与未进行土体加固情况对比,分别减少了约18%和29%。因此,考虑经济与控制基坑变形效果两因素可知,水泥掺入比的合理范围为5%~20%。在这个范围内,基坑底部隆起得到了有效的控制,同时,对于控制支护结构侧向位移效果明显。

表 4 计算结果

Table 4 computational results

水泥掺入比/%	弹性模量/GPa	支护桩最大侧向位移/mm	坑底最大隆起/mm
5	45	0.901 1	2.163 5
10	65	0.875 6	2.068 3
15	96	0.804 8	1.942 5
20	142	0.786 7	1.909 4
25	209	0.779 8	1.889 2
30	307	0.774 4	1.884 2

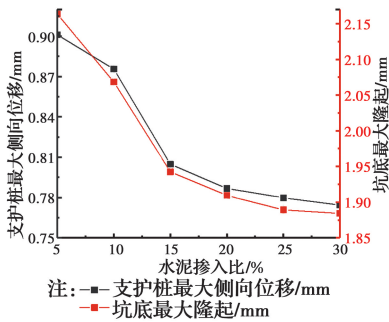


图 13 水泥掺入比与基坑变形关系图

Fig. 13 Relationship between cement-mixed ratio and deformation of foundation pit

3.3.2 满堂加固下不同加固深度对基坑变形的影响 为研究满堂加固合理的加固深度,设定 20 cm (0.5H)、18 cm (0.45H)、16 cm (0.4H)、14 cm (0.35H)、12 cm (0.3H)和 8 cm (0.2H)这 6 种工况进行计算。利用 ABAQUS 有限元软件对 6 种不同工况进行数值模拟,如表 5 所示,计算结果如图 14

表 5 计算结果

Table 5 Computational results

加固深度/cm	支护桩最大侧向位移/mm	坑底最大隆起/mm
8(0.2H)	0.960	2.67
12(0.3H)	0.920	2.43
14(0.35H)	0.800	2.17
16(0.4H)	0.680	2.12
18(0.45H)	0.675	2.08
20(0.5H)	0.672	2.06

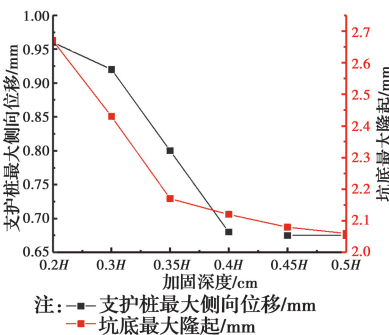


图 14 加固深度与基坑变形关系图

Fig. 14 Relationship between reinforcement depth and foundation pit deformation

所示。随着加固深度的增加,支护桩最大侧向位移逐渐减小,位置均位于距离桩顶 15 cm 处,基本没有变化。随着加固深度增加,坑底隆起也逐渐减小,以坑底隆起最大值作为分析对象,通过比较,加固深度为 0.2H~0.35H,坑底隆起减小量最大,为 0.24 mm;加固深度超过 0.45H 后,坑底隆起减小量很

小,为 0.02 mm。因此,坑底加固深度的合理范围应为 0.4H~0.45H(H 为基坑开挖深度)。

4 结论

将模型试验和数值模拟相结合,对基坑底部土体满堂加固后基坑的变形与受力进行研究,得到以下结论。

1) 基坑底部满堂加固对抑制坑底隆起效果最好;对减小支护结构侧向位移不明显;对减小坑顶地表沉降的效果并不明显。

2) 满堂加固中,增加加固土体的弹性模量较增加加固深度对抑制支护桩侧向位移及坑底隆起更为明显。

3) 基坑底部满堂加固时,水泥掺入比超过一定范围后,加固效果没有显著提升。在含水率为 20%左右的软弱土层地区,建议水泥掺入比宜取 5%~20%左右,可根据实际工程调整。

4) 基坑底部满堂加固情况下,加固深度超过一定范围后,加固效果并不明显。在含水率为 20%左右的软弱土层地区,建议土体加固深度宜取 0.4~0.45 倍基坑开挖深度。

参考文献:

[1] 陈兴年, 刘国彬, 王忠远. 关于软土基坑加固的一点看法[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 79-82, 86, 109.
CHEN X N, LIU G B, WANG Z Y. Some viewpoints on consolidation of soft soil foundation [J]. Underground Space, 2003, 23(1): 79-82, 86, 109. (in Chinese)

[2] SHI S, LI S, LI L, et al. Multi-physical field information comprehensive analysis and application of tunnel water-bearing structure [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2013, 51(3/4): 156-165.

[3] CHUAQUI M, BRUCE D A. Mix design and quality control procedures for high mobility cement based groups[J]. Geotechnical Special Publication, 2011, 120: 1153-1168.

[4] YUN G J, BRANSBY M F. Centrifuge modeling of the horizontal capacity of skirted foundations on drained loose sand [C]//BGA International Conference on Foundations Innovations, Observations, Design and Practice, 2003: 975-984.

[5] BOLTON M, DSTEEDMAN R S. Behaviour of fixed

- cantilever walls subject to latera shaking [C]// Proceedings of a Symposium on the Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design, Manchester, Engl, 1985.
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] 侯新宇, 刘松玉, 童立元. 被动区深搅桩加固对地铁深基坑变形的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 180-184.
- HOU X Y, LIU S Y, TONG L Y. Effect of deep mixing pile reinforce on deformation of deep foundation pit in metro station in passive zone [J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2010, 40(1): 180-184. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] 陈昆, 闫澍旺, 孙立强, 等. 开挖卸荷状态下深基坑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(4): 1075-1082.
- CHEN K, YAN S W, SUN L Q, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(4): 1075-1082. (in Chinese)
- [12] 徐长节, 成守泽, 蔡袁强, 等. 非对称开挖条件下基坑变形性状分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1929-1934.
- XU C J, CHENG S Z, CAI Y Q, et al. Deformation characteristic analysis of foundation pit under asymmetric excavation condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1929-1934. (in Chinese)
- [13] 赵春彦, 黄启友, 郎锋, 等. 单因素和多因素作用下的水泥石强度评估模型试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(11): 2788-2795.
- ZHAO C Y, HUANG Q Y, LANG F, et al. Experimental study on strength evaluation model of cement soil under single factor and multi factors [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(11): 2788-2795. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 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.
- [16] 钱春香, 王安辉, 王欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(06): 1537-1548.
- QIAN C X, WANG A H, WANG X. Advances of soil improvement with bio-grouting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(06): 1537-1548. (in Chinese)
- [17] 周葆春, 王靖涛, 杨晓东. 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. Research on parameters of modified cam clay for Wuhan clay [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(3): 103-107. (in Chinese)
- [18] 贾坚. 控制基坑变形的坑内加固机理研究及实践[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- JIA J. Research and practice of reinforcement mechanism in controlling foundation pit deformation [D]. Shanghai: Tongji University, 2003. (in Chinese)