

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20230105001

文章编号:1672-9331(2025)01-0101-10

引用格式:刘洋,何忠明,王利军,等. 基底土体加固对超长深基坑变形的影响及优化分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2025,22(1):101-110.

Citation: LIU Yang, HE Zhongming, WANG Lijun, et al. Influence of basement soil reinforcement on deformation of ultra-long deep foundation pit and optimization analysis[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2025, 22(1): 101-110.

基底土体加固对超长深基坑变形的影响及优化分析

刘洋¹,何忠明^{1,2},王利军³,王盘盘¹

(1.长沙理工大学 交通学院,湖南长沙 410114; 2.长沙理工大学 公路养护技术国家工程研究中心 湖南长沙 410114;
3.广州地铁集团有限公司 建设事业总部,广东广州 510380)

摘要:【目的】综合考虑基底土体加固的各影响因素对超长深基坑变形的影响,进行加固方案的优化设计。【方法】依托某地铁站基坑项目,采用FLAC3D有限元软件对基坑开挖进行数值模拟,采用正交试验方法综合分析基底土体加固的平面设计形状与加固参数对基坑地下连续墙的侧向位移与基底竖向位移的影响,并分析和确定各因素对上述位移指标的影响效果。【结果】基底土体加固方式的不同平面设计形状对超长深基坑变形影响不同,其中满堂加固方式对基坑变形的控制作用较显著,但裙边加固方式对于控制地连墙的变形也能够发挥很好的作用;不同加固参数对基坑变形影响也不同,对变形的控制效果会随着水泥掺量(质量分数)及加固厚度的增加而变好;基底土体加固平面设计形状对超长深基坑变形控制的影响较大,水泥掺量和加固厚度对超长深基坑变形控制的影响相对较小。在基底土体使用满堂加固方式、水泥掺量在14%~16%和加固厚度在10~12 m时,对基坑变形的控制效果最理想。【结论】在超长深基坑设计时,要考虑基底土体加固方式的平面设计形状,还需要深入考虑在该平面设计形状下加固参数对基坑的影响;在同类型基坑设计时,应优先考虑满堂加固方式的平面设计形状,必要时可适当减小水泥掺量及加固厚度,以提高基坑工程设计的经济合理性。

关键词:基坑开挖;基底土体加固;数值模拟;基坑变形;优化分析

中图分类号:TV551.4;TU470.3

文献标志码:A

Influence of basement soil reinforcement on deformation of ultra-long deep foundation pit and optimization analysis

LIU Yang¹, HE Zhongming^{1,2}, WANG Lijun³, WANG Panpan¹

(1. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Construction Business Headquarters, Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou 510380, China)

Abstract: [Purposes] The influence of various influencing factors of basement soil reinforcement on the deformation of ultra-long deep foundation pit was comprehensively considered, and the design of the reinforcement scheme was optimized. [Methods] Based on the foundation pit project of a subway station, FLAC3D finite element software was used to numerically simulate the

收稿日期:2023-01-05;修回日期:2023-03-24;接受日期:2023-03-24

基金项目:国家自然科学基金(51978084);广州地铁集团有限公司科研项目(HT200856);长沙理工大学研究生“实践创新与创业能力提升计划”(SJCX2021111)

通信作者:何忠明(1980—)(ORCID:0000-0002-4587-0160),男,教授,主要从事道路与铁道工程方面的研究。

E-mail:hezongming45@126.com

excavation of the foundation pit, and the orthogonal test method was used to comprehensively analyze the influence of the planar design shape and reinforcement parameters of the basement soil reinforcement on the lateral displacement of the underground continuous wall and the vertical displacement of the foundation pit. In addition, the influence of various factors on the above displacement indexes was analyzed and determined. [Findings] The different plane design shapes of the basement soil reinforcement have different effects on the deformation of the ultra-long deep foundation pit, and the reinforcement method of the entire basement soil has a significant control effect on the deformation of the foundation pit. The reinforcement method along the diaphragm wall can also play a good role in controlling the deformation of the diaphragm wall. Different reinforcement parameters have different effects on foundation pit deformation, and the deformation control effect gets better with the increase in cement content and reinforcement thickness. The plane design shape of the basement soil reinforcement has a great influence on the deformation control of the ultra-long deep foundation pit, and the reinforcement thickness and cement content have relatively little influence on the deformation control of the ultra-long deep foundation pit. The control effect on the deformation of the foundation pit is the most ideal when the reinforcement method of the entire basement soil is used with a cement content of 14%–16% and reinforcement thickness of 10–12 m. [Conclusions] In the design of an ultra-long deep foundation pit, the plane design shape of the basement soil reinforcement should be considered, and the influence of the reinforcement parameters on the foundation pit under the plane design shape should also be comprehensively considered. In the design of the same type of foundation pits, priority should be given to the plane design shape of the reinforcement method of the entire basement soil, and the cement content and reinforcement thickness can be appropriately reduced if necessary, so as to improve the economic rationality of foundation pit engineering design.

Key words: excavation of foundation pit; basement soil reinforcement; numerical simulation; deformation of foundation pit; optimization analysis

Foundation items: Project (51978084) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (HT200856) supported by Scientific Research Project of Guangzhou Metro Group Co., Ltd.; Project (SJCX2021111) supported by “Practical Innovation and Entrepreneurship Ability Enhancement Program” for Graduate Students of Changsha University of Science & Technology

Corresponding author: HE Zhongming (1980—)(ORCID: 0000-0002-4587-0160), male, professor, research interest: road and railway engineering. E-mail: hezhongming45@126.com

0 引言

近年来,随着城市化进程的加速推进,城市地面可开发土地资源日益稀缺,城市发展也受到了限制。为了缓解城市中已趋饱和的地上建筑和交通压力,我国城市地下空间的开发与利用已成为关键领域。在这一背景下,基坑开挖的深度不断加深,其对周边既有建筑物的影响亦日益显著。尤其在高楼林立的城市,如上海、广州等地,传统

的简易放坡开挖方法或常规支护结构往往无法满足强度和变形控制的严格要求。深基坑设计最初是强度控制,现已发展到系统控制、变形控制,主要通过对基坑坑内土体的加固来提高围护结构的稳定性。故基坑优化设计具有重要意义^[1-4]。

陈兴年等^[5]将基坑加固分为被动加固和主动加固两类,分析了这两类软土基坑加固的变形控制原理和设计思路,指出了选择合适的加固区域是保证基坑安全的前提。梁鹏宇^[6]通过对比被动区在加固前后提供的抗力,证实了被动区土加固

是控制基坑变形的有力、有效手段。由于基坑工程涉及复杂地基土、围护结构,以及与周边结构的相互作用等问题,数值模拟方法能够较为便捷地进行求解^[7-10]。高鹏^[11]、康志军等^[12]、谈亦帆等^[13]利用有限元软件分析了被动土加固对深基坑变形的影响。熊春宝等^[14]采用Abaqus有限元软件建立三维模型,并分析了基底土体在满堂式加固、格栅式加固和抽条式加固等不同平面设计形状时对围护结构和基底的变形影响。可见,大多数文献侧重于研究基底土体加固平面设计形状对于基坑变形的影响,而对于水泥掺量(全文中均为质量分数)等加固参数对基坑开挖变形的作用仍鲜有研究。因此,业内仍须进一步系统、全面地分析不同平面设计形状和不同加固参数对基坑变形的影响,以提出科学合理的基底土体加固设计方案。

本研究综合考虑基底土体加固的各影响因素对超长深基坑变形的影响,依托地铁基坑项目,采用FLAC3D有限元软件,并结合正交试验分析法对基底土体加固的不同平面设计形状(满堂式、裙边式、抽条式)与不同加固参数(水泥掺量、加固厚度)对基坑工程的变形影响进行综合对比研究,最后提出超长深基坑基底土体加固优化设计方案。本研究拟选出满足安全、经济要求的基底土体加固平面设计的最优形状及参数,为类似工程的优化设计提供一定的指导和借鉴。

1 数值模型的建立

1.1 工程概况

琶洲站超大深基坑项目采用明挖法施工。基坑为超长深基坑,总长为526.0 m,车站区段标准段宽73.0 m,明挖区间标准段宽47.8 m,基坑深28.8~34.4 m。场地范围内各地层物理力学参数如表1所示。

琶洲站超大深基坑呈刀把形,支护结构则是采用地下连续墙作为围护结构,并加4道钢筋混凝土内支撑。其支护结构平面简图如图1所示,支撑结构的计算参数如表2所示。其中,地下连续墙厚1.0 m;4道支撑均采用钢筋混凝土边桁架对撑体系;钢筋混凝土支撑采用C35砼、HRB400钢筋,其截面的长为900 mm,宽为1 200 mm;钢换撑采用

直径800 mm的Q235钢管,细管壁厚 t 为20 mm。本研究在数值模拟中使用梁单元来代替支撑。

表1 各地层的物理力学指标参数

Table 1 Physical and mechanical index parameters of various layers

土体名称	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/ $^{\circ}$	变形模 量/MPa	泊松 比	厚度/ m
填土	1.99	12	15	4	0.26	2.0
淤泥	1.55	9	8	3	0.42	4.0
淤泥质土	1.67	10	10	4	0.40	3.5
淤泥质 粉细砂	1.77	0	24	8	0.30	4.0
细砂	1.85	0	24	10	0.25	5.0
粉质黏土	1.98	20	15	13	0.28	15.5
粉土	1.98	19	15	12	0.25	4.0
全风化碎岩	2.02	33	23	50	0.28	3.7
强风化岩	2.15	42	26	90	0.28	5.1
中风化岩	24.70	300	32	850	0.29	2.7
未风化岩	25.50	500	40	3 000	0.29	

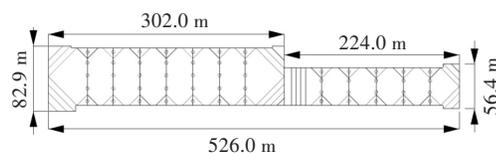


图1 支护结构平面简图

Fig. 1 Schematic plan of support structure

表2 支撑结构的计算参数

Table 2 Calculation parameters of support structures

名称	容重/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模型/GPa	泊松比
地下连续墙	25.0	31.5	0.167
钢筋混凝土支撑	25.0	31.5	0.167
主体结构	25.0	31.5	0.167
钢支撑	78.5	206.0	0.250

1.2 模型的建立

本研究首先采用Rhinceros 6.0对基坑进行建模,然后将生成的模型导入至有限差分软件FLAC3D,最后建立内支撑并进行数值模拟分析。

现有研究表明,基坑开挖影响深度范围一般为基坑开挖深度的2~4倍,其影响宽度范围为基坑开挖宽度的3~4倍^[15]。故本研究设定基坑模型尺寸为730.0 m×240.0 m×100.0 m。在进行建模时,网格太疏会降低计算精度,网格太密会导致计算效率大大降低。故本研究对重点研究部分的网格进行加密,并对周围的网格采用逐渐稀疏的形式,以保证数值模拟的精度和效率。本研究采用Griddle软件生成网格并导出网格,如图2所示。

划分网格后的模型分为 279 892 个网格单元与 326 399 个节点。

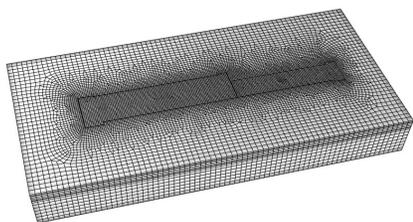


图2 网格模型

Fig. 2 Grid model

本研究首先将网格导入到FLAC3D,建立梁单元来设置支撑(图3),然后对模型进行赋予参数、本构模型操作,并设置边界条件。本研究土层采用一种理想的弹塑性模型——Mohr-Coulomb本构模型。该模型在本质上是由线弹性模型和Mohr-Coulomb破坏准则组成,可以对土体的塑性变形进行描述,并反映土体的破坏特征,同时计算需要的5个参数都能够从勘察报告中获得。Mohr-Coulomb模型尽管存在缺陷,但仍能准确描述土体的失稳特性,对基坑、边坡等工程的稳定性分析也有一定的参考价值,故目前已被广泛用于岩土工程领域。

本研究中的模拟部分来源于现场施工工况,如表3所示。基坑开挖前采取降水措施,并设置了

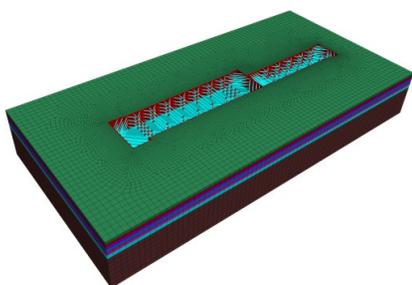


图3 包含内支撑的结构模型图

Fig. 3 Structural model including inner support

表3 基坑开挖计划工况

Table 3 Planned excavation conditions for foundation pits

工况	施工步骤
1	进行地基加固处理、位移清理
2	激活地下连续墙
3	基坑开挖到-2.0 m,在-1.5 m处安装支撑
4	基坑开挖到-10.2 m,在-9.7 m处安装支撑
5	基坑开挖到-16.9 m,在-16.4 m处安装支撑
6	基坑开挖到-23.9 m,在-24.4 m处安装支撑
7	开挖到基地-30.0 m

止水帷幕。为了能够简化数值模拟的计算过程,本研究忽略地下水渗流对深基坑变形规律及稳定性的影响。

2 基底土体加固优化分析

2.1 基底土体加固

基坑工程的开挖使基坑坑底土体产生卸荷作用,且一定范围内的基底土体因强度显著降低而产生较大的竖向回弹变形。这些对基坑工程的稳定及变形控制产生不利影响。被动区土体加固能有效地控制基坑开挖引起的基底竖向隆起、地下连续墙“凸肚”及基坑临近土的沉降变形,还能保护基坑周边环境,故在实际工程中得到广泛的应用。通常基底土质环境不良,基坑处在市中心,且基坑周围的相邻建筑较多、较近,基坑深度较大。为避免基坑开挖引起周围建筑对地铁隧道产生较大变形影响,基底采用高压旋喷桩进行加固。

基底土体加固的平面设计形状可分为满堂式、裙边式、墩式、中空式、抽条式、格栅式,如图4所示,其中灰色部分为加固位置。本研究模拟表3的工况,对基底土体加固进行优化分析。

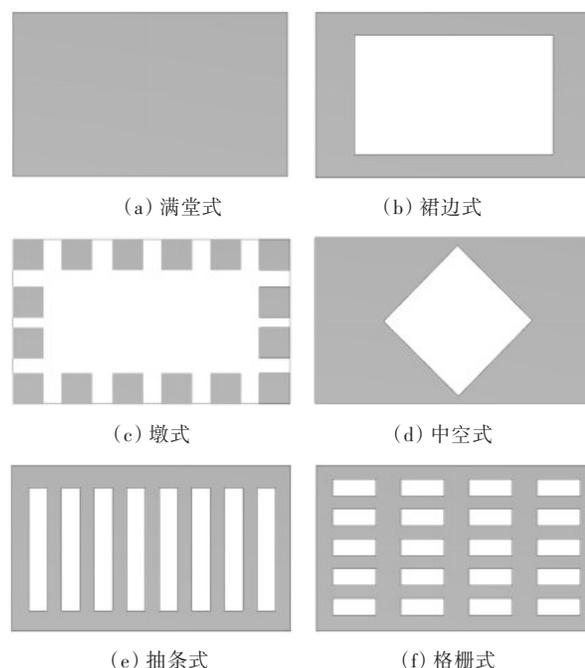


图4 基底土体加固平面设计形状

Fig. 4 Plane design shape of basement soil reinforcement

2.2 正交试验设计

在具有诸多不确定因素的岩土工程试验中,正交试验法能大大减少试验次数。正交试验分析方法能通过少量的试验获得大量的信息,找出试验指标最佳组合,分析出影响试验指标的各因素的重要性,比常用的安排试验的方法更科学、更合理。正交试验分析方法已在工程设计与岩土工程科学研究中发挥了独特的作用^[16]。

结合其他工程实例及文献可知,基底土体加固的厚度、水泥掺量及加固的平面设计形状都对基坑变形有很大的影响。水泥掺量对水泥土的主要力学指标——无侧限抗压强度的影响很大:当水泥掺量小于 5% 时,水泥土固化程度低,强度的离散性也较大;当水泥掺量大于 20% 时,水泥与土反应所形成的胶体处于饱和状态,此时强度增长缓慢^[6]。目前,加固方式常选择注浆加固。基于业内的一般规定,即注浆加固中的水泥数量不宜小于 120 kg/m³,本研究选取了三种不同的水泥掺量,即 8%、14%、20%。上海地区的加固深度一般为 0.3H ~ 0.5H(H 为地下连续墙的高度, m)^[18-19],故本研究选取 5.0、10.0、15.0 m。土体加固中的满堂式布置、格栅式布置、抽条式布置一般用于基坑较窄,且环境保护要求较高的基坑加固;裙边式布置一般用于基坑较宽,且环境保护要求较高的基坑加固^[6]。基底土体加固平面布置形式选择满堂式加固、抽条式加固、裙边式加固。其中,满堂式加固的加固比为 100%;抽条式、裙边式加固比分别为 53.69%、54.44%,如图 5 所示。在数值模拟软件中,基底土体加固不同平面设计形状模型如图 6 所示。

本研究在已有研究的基础上,结合项目设计方案来设计试验的影响因子与水平(表 4),选用三因素三水平的 L₉(3⁴)型正交设计方案。不同土层的加固体的物理力学参数如表 5 所示。

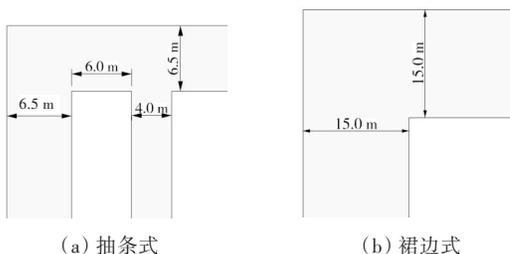


图 5 基底土体加固平面形状尺寸

Fig. 5 Plane shape and size of basement soil reinforcement

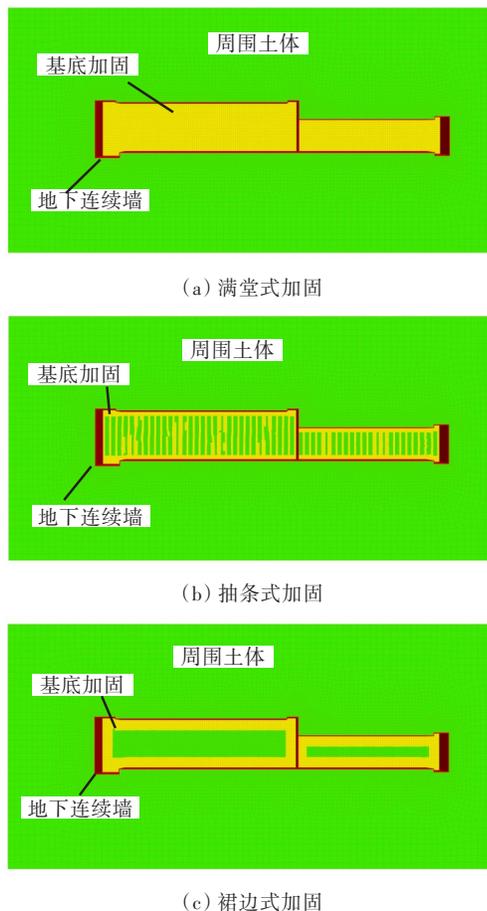


图 6 基底土体加固不同平面设计形状模型

Fig. 6 Different plane design shape models of basement soil reinforcement

表 4 试验选定的因子与水平

Table 4 Selected factors and levels of test

水平	水泥掺量(A)/%	平面设计形状(B)	加固厚度(C)/m
1	8	满堂式加固	5.0
2	14	抽条式加固	10.0
3	20	裙边式加固	15.0

表 5 加固体物理力学参数

Table 5 Physical and mechanical parameters for reinforcement

水泥掺量/%	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	泊松比	密度/(g·cm ⁻³)
8	25.7	130	84	130	0.2	1 915
10	30.1	220	128	220		
12	30.6	260	152	260		
14	27.0	310	210	310		
16	29.0	387	270	387		
18	32.3	420	340	420		
20	36.0	536	400	536		

2.3 正交试验结果分析

2.3.1 正交试验结果

正交试验的模拟结果如正交表6所示,各因子水平优劣情况如表7所示。

表6 正交表 $L_9(3^4)$ 计算结果

Table 6 Calculation results of orthogonal table $L_9(3^4)$

试验序号	各因素水平			位移/mm	
	A	B	C	基底最大竖向位移	连续墙最大侧向位移
1	1	1	1	32.207	37.003
2	1	2	2	34.952	44.895
3	1	3	3	47.919	34.782
4	2	1	2	19.813	27.012
5	2	2	3	30.979	38.283
6	2	3	1	53.695	35.241
7	3	1	3	14.162	22.148
8	3	2	1	30.268	41.721
9	3	3	2	48.867	30.936

表7 各因子水平优劣

Table 7 Advantages and disadvantages of each factor

影响因素	参数	位移/mm	
		基底最大竖向位移均值 m	地下连续墙最大侧向位移均值 n
水泥掺量(A)	1A	38.359	38.893
	2A	34.829	33.512
	3A	31.099	31.602
平面设计形状(B)	1B	22.061	28.721
	2B	32.066	41.633
	3B	50.160	33.653
加固厚度(C)	1C	38.723	37.988
	2C	34.544	34.281
	3C	31.020	31.738

2.3.2 不同因素对基底最大竖向位移的影响

本研究对基底最大竖向位移均值 m 进行分析。从表7可以看出:基底最大竖向位移均值为 $m_{1A}=38.359$ mm、 $m_{2A}=34.829$ mm、 $m_{3A}=31.099$ mm,且存在 $m_{3A}<m_{2A}<m_{1A}$ 。因此可以判断,基底最大竖向位移随着水泥掺量增大而减小。同理,据 $m_{1B}<m_{2B}<m_{3B}$ 可以判断,满堂加固方式对于基坑竖向的限制作用是最大的,裙边加固方式的作用是最小的。基底竖向位移并非随着加固面积增加而减小(试验中满堂式、抽条式、裙边式加固的加固比分别为100%、53.69%、54.44%)。同理,据 $m_{3C}<m_{2C}<m_{1C}$ 可以判断,基底最大竖向位移随着加固厚度增大而变小。

2.3.3 不同因素对地下连续墙最大侧向位移的影响

本研究对地下连续墙最大侧向位移均值 n 进行分析。从表7可以看出,地下连续墙最大侧向位移均值为 $n_{1A}=38.893$ mm、 $n_{2A}=33.512$ mm、 $n_{3A}=31.602$ mm,且存在 $n_{3A}<n_{2A}<n_{1A}$ 。因此可以判断,地下连续墙最大侧向位移随着水泥掺量增大而减小。同理,根据 $n_{1B}<n_{3B}<n_{2B}$ 可以判断,满堂加固方式对于地下连续墙侧向位移的影响最大,但是裙边加固方式与满堂加固方式的影响相当,抽条加固对于地下连续墙的侧向位移的影响最小。同理,根据 $n_{3C}<n_{2C}<n_{1C}$ 可以判断,地下连续墙最大侧向位移随着加固厚度增大而变小。

由表7中的试验数据可以计算出 m 、 n 的平均值分别为 $\bar{m}=34.762$ mm、 $\bar{n}=34.669$ mm,并通过式(1)得出表8中的数据。

$$S_i = (x_{1i} - \bar{x}_i)^2 + (x_{2i} - \bar{x}_i)^2 + (x_{3i} - \bar{x}_i)^2 \quad (1)$$

式中: i 为表7中的影响因素,即 $i=A, B, C$; S_i 为 i 的离差平方和; x_i 为 i 的数据; x_{1i}, x_{2i}, x_{3i} 分别为 i 在不同参数水平1、2、3下的试验数据; \bar{x}_i 为 x_i 的平均值,即 $\bar{x}=\bar{m}, \bar{n}$ 。

表8 各因素离差平方和

Table 8 Sum of squares of dispersions of each factor

影响因素	不同部位位移的离差平方和S	
	基底最大竖向位移	地下连续墙最大侧向位移
水泥掺量(A)	26.362	17.461
平面设计形状(B)	405.697	57.926
加固厚度(C)	29.741	10.621

经比较得知,基底土体加固的平面设计形状(B因子)对基底最大竖向位移及地下连续墙最大侧向位移的影响最大。因此,为控制好地下连续墙的最大侧向位移和基底的基底最大竖向位移,业内可以对基底土体加固的平面设计形状进行优化,而水泥掺量与加固厚度的改变对基坑变形的影响较小,特别是对于地下连续墙最大侧向位移影响更小。在考虑限制基坑变形时,应该先考虑基底土体加固形状,不宜首先采用增大水泥掺量及加固厚度来减小基坑的变形程度。

3 基底土体加固不同参数敏感性分析

3.1 基底加固形状的影响

表 6 中的试验 1、2 分别为满堂加固与抽条加固方式,且他们的总加固土体体积与水泥掺量均相同。对比研究试验 1、2 的结果可知,在水泥掺量与加固总体积均相同的情况下,满堂加固对基坑的变形限制作用更好,更有利于控制超长深基坑变形。

3.2 水泥掺量的影响

为研究水泥掺量在满堂加固方式下对超长深基坑变形的影响,本研究保持加固体厚度 10 m 不变,水泥掺量分别选取 8%、10%、12%、14%、16%、18%、20%,并使用 FLAC3D 有限元软件对 7 种不同工况进行数值模拟。在不同水泥掺量下,基坑地下连续墙某监测点的侧向位移、基坑坑底中线的竖向位移如图 7~8 和表 9 所示。

由图 7~8 可以看出,基坑的变形随着水泥掺量逐渐增大而逐渐减小,且在水泥掺量为 18%、20% 时,基底的竖向变形最小。由表 9 可以看出:当水泥掺量为 16% 时,基底变形控制效果开始不明显;水泥掺量为 16% 时的基坑竖向位移为 17.959 mm,只比水泥掺量为 14% 时的(19.420 mm)减少了 1.461 mm;水泥掺量为 16% 时的地下连续墙水平位移(25.334 mm)也只比水泥掺量为 14% 时的(26.502)减少了 1.168 mm。这说明:此基底土体加固的水泥掺量在为 14%~16% 时,对于

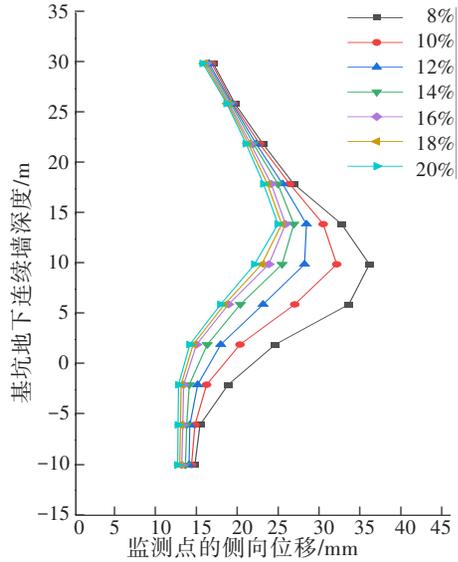


图 7 不同水泥掺量下的基坑地下连续墙某监测点的侧向位移

Fig. 7 Lateral displacement of a monitoring point of diaphragm wall of foundation pit under different cement contents

表 9 不同水泥掺量下模拟结果

Table 9 Simulation results with different cement contents

水泥掺量/%	基坑坑底中线 竖向位移/mm	地下连续墙监测点 侧向位移/mm
8	29.588	34.713
10	24.917	31.553
12	21.730	27.576
14	19.420	26.502
16	17.959	25.334
18	17.266	24.707
20	16.902	24.002

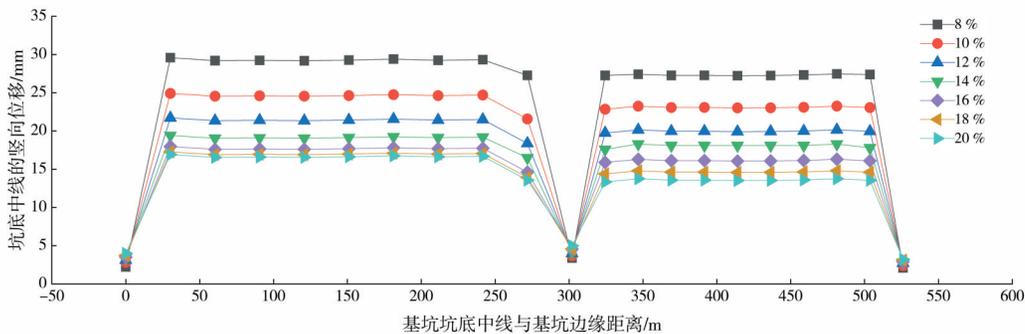


图 8 不同水泥掺量下的基坑坑底中线的竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of midline at bottom of foundation pit under different cement contents

控制基坑的变形有着明显效果;过大的水泥掺量对基坑变形量的控制作用是十分有限的。所以,在基坑加固时,水泥掺量的选取应根据工程的实

际情况进行经济、合理的设计。

3.3 加固厚度的影响

在分析不同加固厚度对于基坑变形的影响

时,平面尺寸保持不变,水泥掺量采用14%,加固厚度分别设定为4、6、8、10、12、14 m,使用FLAC3D有限元软件对7种工况进行数值模拟,并比较不同加固厚度对基坑变形的影响。地下连续墙和基底中线的竖向位移如图9~10和表10所示。

由图9~10可知,基坑的变形随着加固厚度增大而逐渐减小。由表10可以推断出:当基坑无加固时,变形较大;当基坑加固厚度为14、16 m时,基坑的变形得到了较好的抑制;当基坑加固厚度从10 m增加至12 m时,基底竖向变形从19.420 mm降到了18.302 mm,仅减少了1.118 mm。同理,在考虑加固厚度对于基坑的地下连续墙侧向位移影响时,加固厚度为12 m时的地下连续墙侧向位移为24.903 mm,只比加固厚度为10 m时的(26.502 mm)减少了1.599 mm。这说明:此项目基底土体的合理加固厚度为10~12 m,对于抑制基坑的变形具有明显效果;加固厚度在此基础上再增大,对基坑变形的控制作用不明显。所以,基坑加固厚度要根据工程实际情况进行经济、合理的设计。

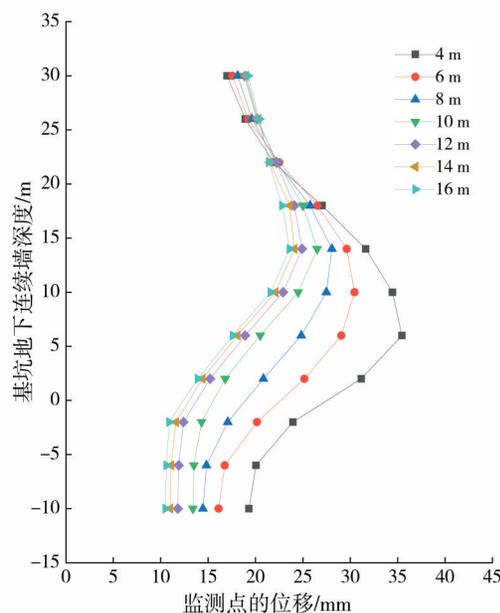


图9 不同加固厚度下的基坑地下连续墙某监测点的侧向位移

Fig. 9 Lateral displacement of a monitoring point of diaphragm wall of foundation pit under different reinforcement thicknesses

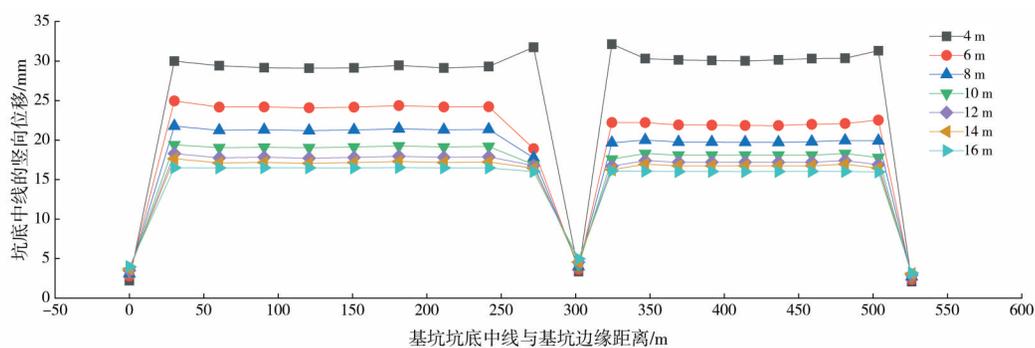


图10 不同加固厚度下的基坑坑底中线的竖向位移

Fig. 10 Vertical displacement of midline at bottom of foundation pit under different reinforcement thickness

表10 不同加固厚度计算结果

Table 10 Calculation results of different reinforcement thicknesses

基坑的加固厚度/m	基坑中线的竖向位移/mm	地下连续墙监测点的侧向位移/mm
4	32.138	35.449
6	24.963	30.465
8	21.783	28.063
10	19.420	26.502
12	18.302	24.903
14	17.652	24.088
16	16.500	23.634

4 讨论

近年来,许多国内外学者侧重研究基底土体加固的平面设计形状对基坑的变形影响,忽视了不同加固参数对基坑控制变形能力的影响。综合考虑基底土体加固平面设计形状与参数对超长深基坑变形影响的研究仍鲜见。

本研究首先通过FLAC3D有限元软件对超长深基坑开挖进行数值模拟计算,然后使用正交试验分析法对在不同加固方式、不同加固参数下的

基坑工程变形进行对比研究,最后发现:基底土体加固的平面设计形状对基坑变形的影响较大,同时加固参数也存在一定的影响。因此,业内在进行基坑工程基底土体加固设计时,应优先考虑基底土体加固的平面设计形状,并在此基础上选择合适的加固参数,才能够得到经济、合理的加固设计方案。本研究的成果和方法可为类似基坑的优化设计提供参考。

基底土体加固对基坑工程稳定性的作用机理非常复杂,同时受地下水、卸荷应力路径等条件的影响。下一步,本课题组将结合室内试验及本构模型进行更深入、系统的研究。

5 结论

本研究使用正交试验分析法,不仅考虑了超长深基坑底部土体加固的平面设计形状对基坑变形的影响,还深入研究了基底土体在不同加固平面设计形状(满堂式、裙边式、抽条式)与不同加固参数(水泥掺量、加固厚度)对超长深基坑工程变形的影响,得出如下主要结论:

1) 超长深基坑底部土体加固的平面设计形状对基坑变形的影响较大,加固厚度和水泥掺量也具有影响。在考虑限制基坑变形的时候,应该先考虑基底土体加固形状,不宜首先采用增大水泥掺量和加固厚度来减少基坑的变形。

2) 不同加固面设计形状对基坑变形的控制效果不同,其中的满堂加固方式对基坑变形的控制效果较显著。但是,基底竖向位移并非随着加固比增大而减小,抽条式对于基底竖向位移的控制效果要好于裙边式的。所以,在满足其他变形要求的情况下,抽条式加固方式对于控制基底竖向变形更为经济。对于地下连续墙变形,除了满堂式加固方式,裙边式加固方式也能够起到很好的控制效果。

3) 基坑变形的控制效果随加固参数不同而不同,且均随着水泥掺量与加固厚度增大而变好,但一味增大水泥掺量与加固厚度并不可取。当加固方式为控制效果显著的满堂加固方式、基底土体加固的水泥掺量为14%~16%、加固厚度为10~12 m时,基坑工程变形的控制效果最为理想。

因此,业内在对超长深基坑底部土体进行加固设计时,首先对基底土体加固的平面设计形状优先考虑采用满堂式加固方式;然后,须选择合适加固参数,必要时可适当减小水泥掺量和加固厚度,以得到经济、合理的基坑加固设计方案。

[参考文献]

- [1] 王卫东,王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
WANG Weidong, WANG Jianhua. Design, analysis and case histories of deep excavations supported by permanent structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [2] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36. DOI: 10.11779/CJGE202201001.
ZHENG Gang. Method and application of deformation control of excavations in soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(1): 1-36. DOI: 10.11779/CJGE202201001.
- [3] 何忠明,王盘盘,王利军,等. 超大深基坑开挖变形演化规律及优化设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2022, 19(3): 69-77. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.007.
HE Zhongming, WANG Panpan, WANG Lijun, et al. Deformation evolution law and optimization design of huge deep foundation pit excavation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(3): 69-77. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.03.007.
- [4] WANG Y, ZHANG F. Effects of pit-bottom-soil reinforcement on the deformation of subway deep foundation pits based on an improved model [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022(3): 1-8. DOI: 10.1155/2022/2661311.
- [5] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2003.01.021.
CHEN Xingnian, LIU Guobin, WANG Zhongyuan. Some viewpoints on consolidation of soft soil foundation [J]. Underground Space, 2003, 23(1): 79-82, 86. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0836.2003.01.021.
- [6] 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 Pengyu. Effect of soil improvement on deformation of foundation pit in soft-clay area [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [7] 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. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.04.021.

- CHEN Kun, YAN Shuwang, SUN Liqiang, et al. Analysis of deformation of deep foundation pit under excavation unloading condition [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(4): 1075-1082. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.04.021.
- [8] 刘波, 章定文, 刘松玉, 等. 大断面顶管通道近接穿越下覆既有地铁隧道数值模拟与现场试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(11): 2850-2860. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1214.
- LIU Bo, ZHANG Dingwen, LIU Songyu, et al. Numerical simulation and field monitoring on a large cross-section pipe-jacking underpass traversing existing metro tunnels [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(11): 2850-2860. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.1214.
- [9] 康志军, 谭勇, 李想, 等. 基坑围护结构最大侧移深度对周边环境的影响[J]. *岩土力学*, 2016, 37(10): 2909-2914, 2920. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.10.023.
- KANG Zhijun, TAN Yong, LI Xiang, et al. Influences of depth of maximum lateral deflection of excavation support on adjacent environment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 2909-2914, 2920. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.10.023.
- [10] 黄宏伟, 黄栩, SCHWEIGER F H. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(3): 182-189. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.03.011.
- HUANG Hongwei, HUANG Xu, SCHWEIGER F H. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(3): 182-189. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.03.011.
- [11] 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 Peng. Numerical analysis of effects of different ways of reinforcements on deformations of deep foundation pit [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [12] 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. DOI: 10.11988/ckyyb.20160195.
- KANG Zhijun, TAN Yong, DENG Gang, 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. DOI: 10.11988/ckyyb.20160195.
- [13] 谈亦帆, 言建标, 熊伟, 等. 基坑底部土体满堂加固模型试验与数值模拟研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(2): 56-64. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.167.
- TAN Yifan, YAN Jianbiao, XIONG Wei, et al. Model test and numerical simulation study of reinforcement of entire basal soil in the bottom of foundation pit [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering (Chinese and English)*, 2020, 42(2): 56-64. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.167.
- [14] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2015.06.001.
- XIONG Chunbao, GAO Peng, TIAN Liyun, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2015.06.001.
- [15] 邹李凤. 土体加固对基坑支护变形影响的有限元分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2020. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2020.000162.
- ZOU Lifeng. Finite element analysis effects of soil reinforcement on foundation pit and supporting structure deformation [D]. Changsha: Hunan University, 2020. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2020.000162.
- [16] 刘波. 上海陆家嘴地区超深大基坑邻近地层变形的实测分析[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(10): 1950-1958. DOI: 10.11779/CJGE201810024.
- LIU Bo. Measurement and analysis of deformation of adjacent strata super deep and large foundation pits in Lujiazui District of Shanghai [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(10): 1950-1958. DOI: 10.11779/CJGE201810024.
- [17] 龚文惠, 雷红军, 宁虎. 正交试验法在土工试验中的应用[J]. *土工基础*, 2006, 20(5): 78-80. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3152.2006.05.029.
- GONG Wenhui, LEI Hongjun, NING Hu. The method of orthotropic test and its application in geotechnical test [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2006, 20(5): 78-80. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3152.2006.05.029.
- [18] 秦爱芳, 胡中雄, 彭世娟. 上海软土地区受卸荷影响的基坑工程被动区土体加固深度研究[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(6): 935-940. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2008.06.025.
- QIN Aifang, HU Zhongxiong, PENG Shijuan. Depth of soil stabilization in passive area of foundation pits for Shanghai soft clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(6): 935-940. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2008.06.025.
- [19] SHI S S, LI S C, LI L P, 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. DOI: 10.1504/IJEP.2013.054026.

(责任编辑:彭三军;校对:毛娜)