

被动区深层搅拌桩加固对超大深基坑变形的影响

刘 溢^{1, 2}, 李镜培^{1, 2}, 陈 伟³

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 上海陆家嘴金融贸易区开发股份有限公司, 上海 200127)

摘要:选取不同加固土体参数,采用土体卸载条件下的 HS(hardening-soil)有限元模型,分析了被动区加固对超大深基坑变形的影响。结果表明:深搅加固对墙体侧向位移的影响随深度增加而增大,可以最终减小墙体侧向位移达 27%左右;在临近墙体局部范围内抑制坑底隆起效果显著,抑制隆起量最多超过 50%;对墙背土体沉降抑制显著,局部降低 60%左右。因此,根据不同地质条件和基坑变形控制要求,选择合理的加固形式使加固土体达到设计强度,既能保证基坑安全和环境影响的要求,又能节省造价。

关键词:超大深基坑;被动区加固;深搅桩;HS 模型

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0465-05

作者简介: 刘 溢(1988-),男,江苏武进人,硕士研究生,从事岩土工程研究工作。E-mail: shangdaly@qq.com。

Effect of reinforcement of deep mixing piles on deformation of ultra-deep excavations in passive zone

LIU Yi^{1, 2}, LI Jing-pei^{1, 2}, CHEN Wei³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and

Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Lujiazui Finance and Trade
Zone Development Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

Abstract: By selecting different parameters of reinforced soil and adopting hardening-soil finite element model based on unloading, the influence of bottom soil on deformation of excavations is studied. The results show that the reinforcing influence on lateral deformation increases with the increase of the excavation depth, and the final lateral deformation can be reduced by 27%. This effect is prominent for controlling the uplift in bottom soil around retaining structures, and the utmost inhibition of uplift may exceed 50%. The influence of reinforcement on soil settlement behind the retaining structures is conspicuous, about 60% in local zone. Therefore, selecting a rational reinforcing form based on different geological conditions and deformation requirements is needed to make the reinforced soil intensity reach the design demand, which can guarantee the excavation safety and environment impact and save the engineering cost.

Key words: ultra-deep excavation; passive zone reinforcement; deep mixing pile; HS model

0 引言

深层搅拌法是用于加固饱和软黏土地基的一种方法,利用水泥、石灰等材料作为固化剂,通过固化剂和软土之间产生的一系列物理-化学反应,使软土硬结成具有整体性、水稳定性和一定强度的优质地基^[1]。近年来,深搅桩加固方法在深基坑工程中也得到应用,通过对坑底土体加固,以提高和改善坑底土体物理力学性能,从而达到控制围护结构和基坑过大变形的目的^[2-6]。软土基坑被动区坑底水泥土加固常用加固方式有:满堂加固、网格加固、抽条加固和裙边加固等。

深搅加固的工艺特点造成加固范围上部土层的扰动,在采用深搅加固时,必须使开挖面上下均得到加

固。一般采用开挖面以下固化剂掺量较大,而开挖面上以上掺量较小的方法。掺量的多少根据设计要求和经验值相结合来确定。超大深基坑的深度和面积都较大,导致水泥用量大。工程人员在考虑造价的同时更为关注其加固效果,即加固对支护结构变形的影响。

深基坑开挖过程是一个土体卸载的过程,被动区土体由于上部土体卸载导致竖直向应力减小;应力主轴发生偏转,偏应力减小的同时球应力减小。国内外学者对不同特定地质条件下,软土基坑变形特性进行

了实测和非线性有限元数值分析,总结了软土深基坑的变形特性^[7-16]。研究表明:加固的被动区经扰动后形成复合土体,其复合参数、应力路径、力学特点等都有别于不加固情况,应力-应变规律更为复杂^[4]。常规试验方法很难真实模拟其受力特点。

工程中,由于加固区复合土体模量显著增加,基坑土体承载力和抗变形能力得以提高,基坑加固中表现为加固体在基坑施工过程中对支护结构变形和稳定性的控制效果明显^[7]。基坑被动区土体加固提高被动区土抗力是一种经济有效的技术措施,可减小支护结构的内力、侧向位移、地面沉降及坑底隆起等。文献[7]对软土基坑开挖周围土体变形离心模型的研究表明,基坑内不同的土体加固形式对于减少土体变形的作用有明显的差异。

本文针对上海陆家嘴塘东总部超大深基坑开挖进行有限元数模拟,分析被动区深搅加固对基坑变形的影响。

1 工程概况

拟建的上海陆家嘴塘东总部基地地下空间开发项目,建设地点位于浦东新区锦康路、东锦江大酒店、杨高南路、花木路的合围地块(如图1所示),总用地面积为53400 m²。基坑规模:基坑呈长方形,东西长约251 m,南北宽约189 m。基坑总面积约46240 m²,围护总长度约957 m。开挖深度:地下室3层层高分别为:6.5, 3.6, 3.6 m, 基础底板建筑板面标高为-13.700 m, 塔楼区基坑开挖深度为13.9~15.2 m;裙房区基坑开挖深度为13.6 m。

本工程基坑围护结构采用1.1 m直径的钻孔灌注桩围护,围护桩外侧采用三轴水泥土搅拌桩作止水帷幕,钻孔灌注桩与止水帷幕之间采用压密注浆加固填充。坑内加固采用深层搅拌桩及压密注浆,其中沿围护桩内侧采用双轴搅拌桩进行加固,对于电梯井、集水井等局部落深区采用三轴水泥土搅拌桩进行加固,并且对坑内采用压密注浆进行坑底加固。非主楼区利用三道结构梁作支撑,主楼区域采用三道临时混凝土支撑,支撑均在同一标高面上。第一道支撑布置施工栈桥,栈桥宽度9.2 m。栈桥作为结构楼板,不予拆除。在第一、二、三道支撑处设置的围檩,支撑梁(即结构梁)支撑于围檩上;在底板边缘设置传力带,使底板支撑于围护结构上。立柱采用430×430钢格构柱,立柱桩采用直径Φ800钻孔灌注桩。立柱桩分为一柱一桩的永久性立柱和临时立柱两种形式,永久性钢格构立柱在逆作施工结束后外包钢筋混凝土形成主体结构柱,临时钢格构柱待地下室结构全部完成并达到强

度后割除。

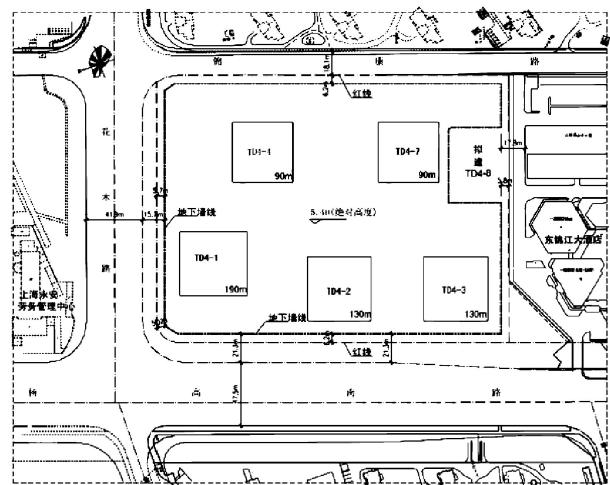


图1 总平面图

Fig. 1 Plan view of excavated area

由于本基坑面积大,为减小逆作法施工时围护的变形、防止深坑隆起及保护周围环境的要求,分不同情况采取不同的加固措施。坑内加固采用双轴及三轴水泥土搅拌桩,沿围护桩内侧进行加固,并对于电梯井、集水井等局部落深区进行加固。基坑内侧沿围护桩及集水井边采用Φ700水泥土搅拌桩进行裙边加固。主楼电梯井深坑周边采用Φ850水泥土搅拌桩进行加固。裙边方式加固宽度5.2 m。坑内加固深度为基底至基底以上8 m,水泥掺量为8%;基底至基底以下4 m,水泥掺量为13%。成桩采用二喷三搅工艺,水灰比0.55。坑内加固搅拌桩与钻孔灌注桩之间进行压密注浆。电梯井深坑内及水泥土搅拌桩内侧进行压密注浆。

2 有限元模型

选取断面开挖深度13.6 m,围护墙为Φ1050@1250钻孔灌注桩。3道支撑,均为钢筋混凝土支撑,截面分别为800×650, 1000×600, 1200×600, 坑内加固区域范围5.2 m×4 m, 基坑加固剖面如图2所示。共有4个典型断面基坑土体开挖工况,每次开挖深度到达下一支撑位置超挖0.5 m, 坑外超载取10 kPa。有限元计算模型如图3所示。

在深基坑开挖过程中,土体的卸载模量与加载模量不同,理想的弹塑性模型不能满足要求。本文采用HS(hardening-soil)模型,该模型是一个考虑了土体剪胀性的塑性模型,在Mohr-Coulomb屈服面基础上引入了一个屈服帽盖。当对土体施加偏应力($\sigma_1 - \sigma_3$)时,土体表现出刚度下降,产生塑性应变。

计算模型采用三轴固结不排水剪切试验(CU)的有效应力指标,深层搅拌加固区的模量选用2种情况

表 1 土层计算参数

Table 1 Geotechnical parameters of soils

土层 编号	名称	厚度/m	γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	c' /kPa	φ' (°)	E_{50}^{ref} /MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /MPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa	ν
①	填土	1	17.6	10.4	17.6	8.41	8.41	25.23	0.28
②	粉质黏土	1.1	18.5	7	30.2	9.72	9.72	29.16	0.29
③	淤泥质粉质黏土	1.9	17.6	2	32.7	6.82	6.82	20.46	0.31
③夹	黏质粉土	3	18.7	5	30.2	18.62	18.62	55.86	0.31
④	淤泥质黏土	1	16.9	7	27.6	4.26	4.26	12.78	0.28
⑤1-1	黏土	2.4	17.9	10	28.6	7.2	7.2	21.6	0.33
⑤1-2	粉质黏土	5.8	18.2	12	29.5	8.5	8.5	25.5	0.33
⑥1	粉质黏土	1.2	19.7	30	29.0	14.62	14.62	43.86	0.31
⑥2	粉质黏土	0.8	19.6	32	27.1	16.7	16.7	50.1	0.32
⑦1-1	黏质粉土	1.6	19.3	5	30.4	19.72	19.72	59.16	0.27
⑦1-1 夹	粉质黏土	0.5	19.0	12.7	31.4	14.04	14.04	42.12	0.27
⑦1-2	砂质粉土	4.8	18.8	5	33.4	24.94	24.94	74.82	0.27
⑦2-1	粉砂	4.2	18.4	4	32.7	27.02	27.02	81.06	0.27
⑦2-2	粉砂	8.9	18.8	5	34.3	31.46	31.46	94.38	0.27
参数 2	水泥土深搅	22.0	50.0	40.0	60.00	60.00	180.00	0.49	

注: γ 为重度; c' 为黏聚力; φ' 为摩擦角; ν 为泊松比; E_{50}^{ref} 为割线弹性模量; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为切线压缩模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载 - 再加载模量。

参数 1 取值: 坑底以上加固土层 (水泥掺量 8%) 取相应土层参数的 1.1 倍, 坑底以下 (水泥掺量 13%) 取相应土层的 1.3 倍。

进行计算, 土层计算参数、围护墙物理力学参数、支撑物理力学参数如表 1~3 所示。

表 2 围护墙物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of wall

材料	$EA / (\text{GN} \cdot \text{m}^{-1})$	$EI / (\text{GPa} \cdot \text{m}^{-1})$	ν
弹性	24.3	1.67	0.15

注: EA 为轴向刚度; EI 为抗弯刚度。

表 3 支撑物理力学参数

Table 3 Physico-mechanical parameters of strut

材料	$EA / (\text{GN} \cdot \text{m}^{-1})$	L_s / m
第一道	弹性	16.38
第二道	弹性	18.90
第三道	弹性	22.68

注: L_s 为支撑间距。

3 计算结果分析

对选定模型进行真实工况下的开挖模拟, 分别对被动区范围进行不加固和深搅加固计算比较, 深搅加固区又根据不同经验取值选取 2 种不同土体强度指标, 见表 1, 分别对支护结构侧向变形和基坑土体变形等进行比较分析。

3.1 深搅加固对围护墙侧向位移的影响

被动区深搅加固对围护墙侧向位移的影响随着开挖深度增大而增大, 当土体开挖到坑底标高位置时影响最大。图 4 为不同加固强度下开挖至坑底时墙体的侧向位移曲线。不管是否加固, 围护墙最终侧向位移最大值都出现在坑底附近, 深搅加固对墙体中部的位移

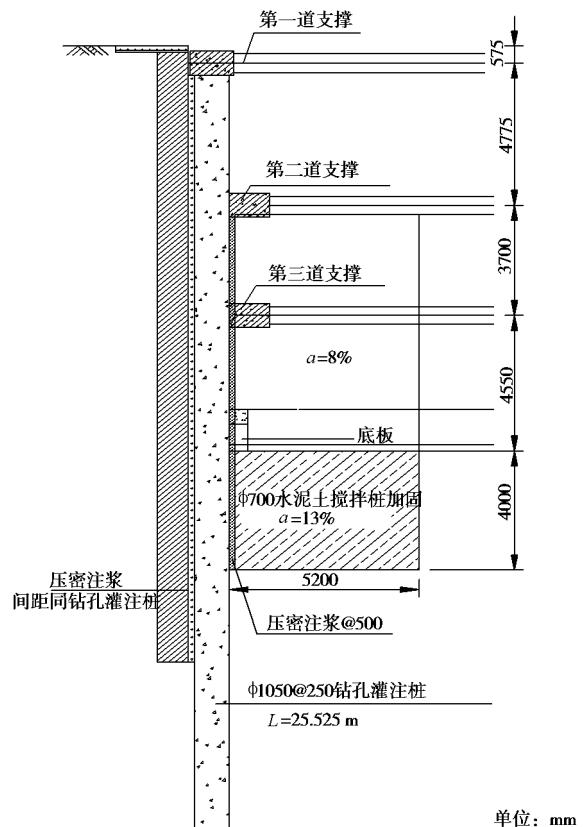


图 2 基坑加固剖面图

Fig. 2 Sectional view of reinforcement of excavation

抑制最为明显。未加固的墙体最大侧向位移值为 33 mm, 采用参数 1 计算得到的最大围护墙侧向位移值为 31 mm, 而采用参数 2 计算得到的最大围护墙侧向位移值为 24 mm, 与实测值 26 mm 接近, 这说明参数 2 是较准确的水泥土变形强度参数。深搅加固可以减小墙体最终侧向位移 27%, 且加固后墙体中部侧向变形趋势

变得平缓。这说明采用水泥土深层搅拌法对深基坑被动区进行加固可以限制基坑侧向变形，且效果明显。从图中可以看出实测值位移最大值出现点高于计算值，这是由于在土体开挖完成后还没有得到足够的塑性发展。

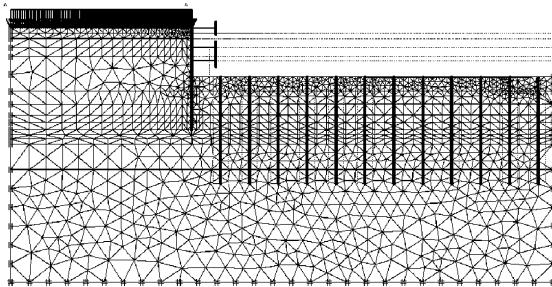


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Finite element model

深搅加固对墙顶侧向位移影响不大，加固后的墙顶位移稍大于未加固时的情况；被动区深搅加固可以在一定范围内限制墙脚的侧向变形。这是由首道钢筋混凝土支撑刚度较大，加之坑底深搅加固增强了坑底刚度，形成了典型的“土拱现象”所造成的。

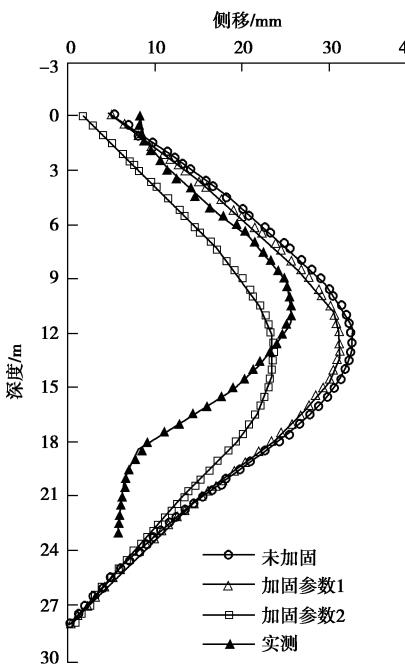


图 4 墙体最终侧向位移曲线

Fig. 4 Final lateral displacement of wall

3.2 深搅加固对坑底土体隆起的影响

坑底深搅加固能够明显减小坑底隆起量，尤其在坑底 7.0 m 左右范围内最为显著（见图 5）。在距墙体 7.0 m 范围内，不加固基坑隆起量达到 130 mm，加固后的隆起量可限制在 60~100 mm，坑底隆起量减少超过 50%以上，且隆起量随距离增大上升缓慢。距墙

体 7.0 m 以外，深搅加固抑制坑底隆起的效果减弱，隆起量在 140~150 mm，距墙体 9 m 范围内均有影响。由此可见，坑底 4 m 范围内的深搅加固可以明显减小墙体附近局部范围的坑底隆起量。

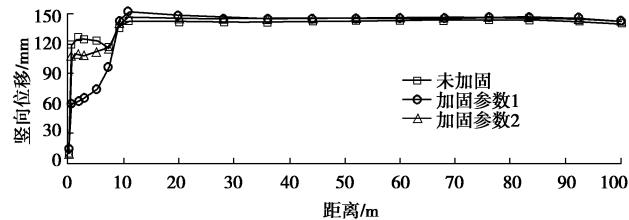


图 5 坑底土体隆起曲线

Fig. 5 Uplift curves of excavation bottom

3.3 深搅加固对坑后土体变形的影响

深搅加固对坑后土体沉降影响不大（见图 6），坑后土体沉降趋势没有改变，加固后最大沉降值减少 7 mm，相对值 60%左右，主要影响范围在坑后 20~25 m 范围内，约为 $2H$ (H 为开挖深度)。由此看出，深搅坑底加固对坑后土体变形的影响，通过水泥土深层搅拌法加固坑底来改善基坑附近建（构）筑物沉降敏感问题可以起到一定作用，但是由于绝对沉降值不大，最大实测值只有 6 mm，所以结论不具代表性。

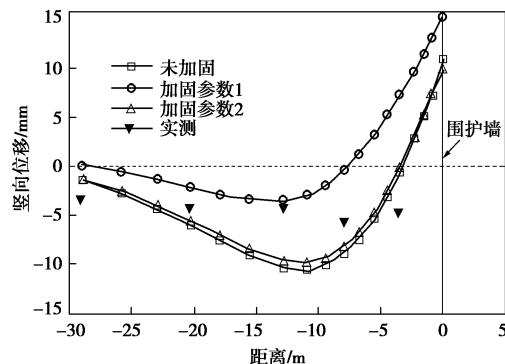


图 6 坑后表面土体沉降曲线

Fig. 6 Ground settlement curves

综上分析，被动区土体水泥土深搅加固，加固区复合土体强度增大，与支撑体系共同作用，使坑后土体产生更为显著的土拱效应，能够较好地发挥围护墙限制土体侧向变形的作用，大大减小墙体侧向位移量。同时，由于加固区的存在，降低了围护墙附近的坑底隆起量，深搅加固对基坑后土体的变形也起到了抑制作用。

4 结语

水泥土深层搅拌桩造价较高，施工周期长，对土体扰动较大。但如果能够根据不同地质条件和不同荷载要求，选择合理的加固形式、不同的桩长和置换率，

可以很好控制支护结构和基坑土体变形过大。使基坑整体稳定性得到大幅提高的同时,也可以解决附近建筑(构)物变形敏感问题。但对于水泥土强度指标的取值还值得研究,可以对进一步的计算提供依据。希望在地勘报告中能提供相应数据。

参考文献:

- [1] 《地基基础手册》编写委员会. 地基处理手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 470 - 475. (Foundation treatment manual[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 470 - 475. (in Chinese))
- [2] 黄宏伟. 深基坑内加固与墙体侧向位移的相互影响实测分析[J]. 建筑结构, 2000, 30(11): 55 - 57. (HUANG Hong-wei. Interaction analysis on consolidation of soil and lateral deformation of retaining wall in excavation pit[J]. Building Structure, 2000, 30(11): 55 - 57. (in Chinese))
- [3] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 86 - 90. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan. Research on deformation of foundation pit engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 86 - 90. (in Chinese))
- [4] 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. (QIN Ai-fang, HU Zhong-xiong, PENG Shi-juan. 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.. (in Chinese))
- [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. (CHEN Xing-nian, LIU Guo-bin, WANG Zhong-yuan. Some viewpoints on consolidation of soft soil foundation[J]. Underground Space, 2003, 23(1): 79 - 82. (in Chinese))
- [6] 付艳斌, 杨 骏, 王铁行. 深基坑开挖变形及被动区土体应力分析[J]. 广西大学学报:自然科学版, 2009, 34(3): 301 - 304. (FU Yan-bin, YANG Jun, WANG Ti-chang. Analysis on de-formation and stress in passive area of the pit[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2009, 34(3): 301 - 304. (in Chinese))
- [7] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings of Design and Performance of Earth Retaining Structures. New York: 1990: 439 - 470.
- [8] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, 2001, 127(3): 203 - 224.
- [9] OU C Y, HSIEH P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30(5): 758 - 767.
- [10] WONG I H, POH T Y, CHUAH H L. Performance of excavations for depressed expressway in Singapore[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(7): 617 - 625.
- [11] Abdel-rahman Ahmed Hosny. Construction risk management of deep braced excavations in Cairo[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2007, 1(4):506 - 518.
- [12] KUNG Gordon Tung-Chin, OU Chang-Yu, JUANG C Hsein. Modeling small-strain behavior of Taipei clays for finite element analysis of braced excavations[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(1/2): 304 - 319.

(本文责编 李运辉)