

引用本文:于至海,吴旭君,曹文昭.软土深基坑被动区超前加固变形控制效果研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(6):71-79.

YU Zhi-hai, WU Xu-jun, CAO Wen-zhao. Research on Deformation Control Effect of Passive Zone Reinforcement Before Excavation of Deep Foundation Pit in Soft Soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 71-79.

DOI:10.19815/j.jace.2021.08056

软土深基坑被动区超前加固变形控制效果研究

于至海¹, 吴旭君², 曹文昭³

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 中国京冶工程技术有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518055;

3. 中冶建筑研究总院(深圳)有限公司, 广东 深圳 518055)

摘要:依托某实际工程,利用FLAC 3D软件建立了3种不同地层参数的基坑有限差分数值模型,验证了土体本构模型的硬化模型比摩尔-库仑模型更适用于基坑工程中,对比分析了裙边加固和满堂加固的加固效果,同时借鉴基坑底部被动区加固思路,提出了在软土深基坑中对开挖段进行超前加固,以控制基坑开挖过程中支护结构位移的方法。结果表明:裙边加固的合理加固宽度为 $0.5h$ (h 为基坑开挖深度),合理加固深度则与坑底的地层条件密切相关;满堂加固的合理加固深度可取 $0.3h$,在某些基坑位移控制特别严格的情况下,满堂加固深度超过 $0.5h$ 后,可考虑优先加固最后一道撑到坑底的土体;开挖段的满堂超前加固可以使首道撑位置下移,为减少支撑道数提供了可行方案;研究为同类工程设计提供了参考依据,进一步丰富了软土地区的深基坑变形控制措施。

关键词:软土;深基坑;被动区;超前加固

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)06-0071-09

Research on Deformation Control Effect of Passive Zone Reinforcement Before Excavation of Deep Foundation Pit in Soft Soil

YU Zhi-hai¹, WU Xu-jun², CAO Wen-zhao³

(1. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China;

2. Shenzhen Branch of China Jingye Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong, China;

3. Central Research Institute of Building and Construction (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518055, Guangdong, China)

Abstract: Based on a practical project, three kinds of finite difference numerical models with different stratum parameters were established by using FLAC 3D software. It was verified that the hardening model was more suitable than the Mohr-Coulomb model in foundation pit engineering, and the effect of skirt edge reinforcement and full pit bottom reinforcement was explored. Besides, based on the idea of passive zone reinforcement at the bottom of foundation pits, advanced reinforcement of excavation section in deep foundation pits in soft soil was proposed to control the deformation of retaining structure. The results show that the hardening model is more suitable than the Mohr-Coulomb model in foundation pit engineering. The reasonable reinforcement width of skirt edge reinforcement is $0.5h$ (h is the excavation depth),

收稿日期:2021-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51808243);中冶建筑研究总院有限公司重大项目(YJA2018Kj02);

广东省自然科学基金项目(2021A1515011682)

作者简介:于至海(1994-),男,河北沧州人,工学硕士研究生,E-mail:326882988@qq.com。

and the reasonable reinforcement depth is closely related to the stratum conditions at the bottom of the pit. The reasonable reinforcement depth of the full pit bottom reinforcement is $0.3h$. In some cases where the displacement of the foundation pit is strictly controlled, when the reinforcement depth is more than $0.5h$, reinforcement priority can be given to the soil between the last brace and the bottom of the pit. The full pit bottom reinforcement can make the position of the first brace move down, which provides a feasible scheme to reduce the number of braces. This study provides a reference for similar engineering design and further enriches the control measures of deep foundation pit deformation in soft soil area.

Key words: soft soil; deep foundation pit; passive zone; reinforcement before excavation

0 引 言

近年来,中国经济持续健康发展,城市化进程不断推进,在新城开发与旧城改造过程中,地下空间的利用得到了极大的发展,基坑工程如今正在向深度更深、面积更大、距离更近、影响因素更多和周围环境更复杂的方向发展,变形控制已经成为深基坑工程设计施工的主要控制要素^[1]。

中国滨海地区软土分布广泛,如珠海等地区,30~40 m 厚的淤泥地质分布并不少见。在此类地区进行基坑工程建设对基坑设计和施工来说是巨大的挑战。为控制软土区深基坑的变形,一味增加支护桩直径、长度和增大内支撑尺寸会使工程量变得巨大。基坑被动区加固作为一种有效的变形控制手段,在软土深基坑工程中已得到广泛应用,它可以改善被动区坑底土体的物理力学指标,提高被动区土体的强度及刚度,从而有效抑制基坑开挖时土体的变形,达到控制基坑变形的目的^[2]。

表 1 中列出了 5 个基坑被动区加固的工程实例及其应用场景说明^[2-6]。虽然基坑被动区加固已在软土地区广泛应用,但并没有明确的设计方法,实际工程应用高度依赖当地设计经验,众多学者针对加固参数进行了相关研究。马海龙^[7]分析了被动区裙边加固的加固深度及加固宽度对基坑变形的影响,结果表明裙边加固存在合理加固深度及加固宽度;郑俊杰等^[8]结合地铁车站实例分析指出,裙边加固宽度与加固深度相当时,加固效果最优,且裙边和抽条结合的加固形式中,保持裙边加固参数不变,加固效果主要与抽条加固的置换率有关,与其断面形状、布置形式无关;秦爱芳等^[9]以卸荷试验为基础,从强度、变形和侧应力变化 3 个方面对被动区土体加固深度进行了研究,给出了上海地区加固深度的参考值;熊春宝等^[10]对满堂、裙边、抽条、格栅 4 种被动区加固形式在坑底隆起和围护结构侧向位移的控制

表 1 基坑被动区加固工程实例
Table 1 Examples of Passive Zone Reinforcement of Foundation Pits

地区	支护体系	被动区加固形式	应用场景
南京 ^[2]	咬合桩+钢管支撑	裙边、抽条、满堂加固结合	基坑近邻建筑、道路、管线
上海 ^[3]	排桩+内支撑	坑底裙边加固	基坑近邻管线、道路、历史建筑
上海 ^[4]	地连墙+内支撑	坑底及开挖段裙边加固	基坑近邻管线、地铁隧道
福州 ^[5]	钢板桩+内支撑	坑底满堂加固	管廊基坑,保护近邻隧道
珠海 ^[6]	放坡+排桩	坑底裙边加固	控制悬臂桩桩顶位移

效果方面进行了讨论;也有一些学者对加固土体刚度的影响效果进行了分析^[11-12]。

被动区加固通常指坑底土体的加固,但也包括坑底以上开挖段土体的超前加固,其平面布置可参考常见的坑底加固布置形式。开挖段超前加固的复合土体最终会随基坑开挖而被挖除,但它对基坑变形性状仍有重要影响,部分学者对开挖段超前加固进行了一定的研究。怀文卫等^[13]结合上海一实际工程,对加固体增加纵向范围的加固效果进行了分析;寿旋等^[14]推导了考虑加固土体作用下的基坑围护结构变形公式,结合实际工程指出增加加固体高度的方法在沿海软土地区具有较强的适用性;李志伟等^[15]对开挖段被动区加固效果进行了系统分析,得到了开挖段加固体的最优加固高度和最优加固宽度。

在长期的工程实践中,基坑被动区加固技术的经济性、实用性已得到越来越多国内外专家的认可,而对软土区基坑开挖段的超前加固,相关的研究和应用还较少。本文运用 FLAC 3D 软件进行数值模拟,对基坑底被动区加固和开挖段超前加固的效果及规律进行探究,以期为滨海软土区深基坑工程设

计与施工提供参考。

1 工程实例与模型建立

1.1 工程实例

某基坑位于广东省佛山市^[16],基坑平面呈正方形,长度约为 94 m,宽度约为 93 m,开挖深度约 10.5 m。围护结构采用 $\phi 1\ 000@1\ 200$ 的灌注桩,桩长 20.4 m,内支撑采用一道 800 mm×800 mm 的钢筋混凝土支撑,设置在-1 m 处。因坑底存在软弱土层,在坑底进行宽 3.25 m、深 5.0 m 的裙边加固,被动区采用 $\phi 550@450$ 的搅拌桩进行加固,置换率约为 1。基坑支护结构和水平位移监测点平面布置如图 1 所示。本文各土层参数以及支护构件、加固体等物理力学参数均参照文献[16]取值,其中土层参数结合监测点处钻孔土样确定,支护构件、加固体参数由抽芯检测强度与经验比例换算关系得出,具体参数见表 2。

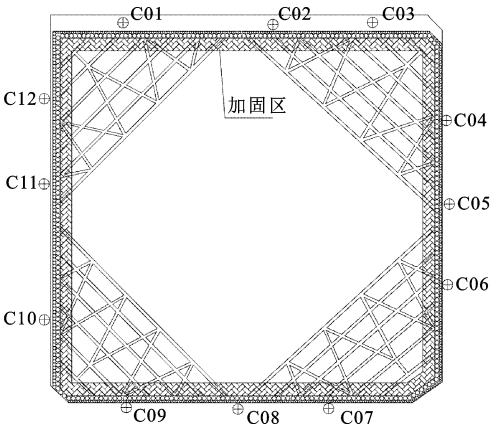


图 1 基坑支护结构和水平位移监测点平面布置
Fig. 1 Layout Plan of Excavation Support Structure and Horizontal Displacement Measuring Points

表 2 土层及结构构件的物理力学参数
Table 2 Physical and Mechanical Parameters of Soil Layers and Structural Elements

土层及构件	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E_s/MPa
素填土	17.0	12	12	6.0
粉砂	18.0	3	22	8.0
淤泥质粉质黏土	16.5	6	5	2.7
粉质黏土	18.5	25	20	27.0
强风化泥质粉砂岩	20.5	100	29	150.0
中风化泥质粉砂岩	21.0	300	32	350.0
灌注桩	25.5			31 400.0
内支撑	25.5			31 400.0
被动区加固土体	18.0	100	25	250.0

注: γ 为重度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; E_s 为变形模量。

1.2 数值模拟几何模型

根据本工程基坑平面形状和基坑支护布置的对称性,取基坑 1/4 结构进行计算,坑内尺寸取 47 m (长)×47 m (宽)。考虑基坑开挖对周围土体的影响,坑外水平方向另取 4 倍基坑开挖深度,坑底竖直方向另取 3 倍基坑开挖深度。

针对本文研究内容建立 A,B,C 三种地层分布的基坑模型,如表 3 和图 2 所示。基坑模型 A 各参数与工程实例一致,通过基坑模型 A 进行土体本构模型的比选,同时将模拟计算的结果与实测值进行对比,验证有限差分模型的有效性。基坑模型 B 在基坑模型 A 的基础上增大了基坑底软土的厚度,开展坑底深厚软土下被动区加固规律的探究,并可与基坑模型 A 已有的裙边加固结论^[16]进行对比验证。基坑模型 C 进一步增大了开挖深度和软土覆盖深度,开展多道支撑下的开挖段超前加固应用探究。

Table 3 Parameters of Foundation Pit Models					
基坑模型编号	土层深度/m	土层类型	支撑位置	开挖深度/m	桩长/m
A	0.0~4.0	素填土	-1.0 m 处	10.5	20.4
	4.0~10.5	粉砂			
	10.5~15.9	淤泥质粉质黏土			
	15.9~18.9	粉质黏土			
	18.9~26.5	强风化泥质粉砂岩			
	26.5~40.0	中风化泥质粉砂岩			
B	0.0~4.0	素填土	-1.0 m 处	10.0	21.0
	4.0~10.0	粉砂			
	10.0~19.0	淤泥质粉质黏土			
	19.0~26.5	强风化泥质粉砂岩			
	26.5~40.0	中风化泥质粉砂岩			
C	0.0~4.0	素填土	-0.5 m 处	15.0	42.0
	4.0~30.0	淤泥质粉质黏土	-5.5 m 处		
	30.0~60.0	粉质黏土	-10.5 m 处		

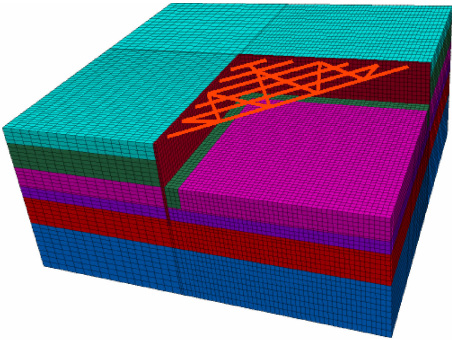


图 2 基坑三维模型
Fig. 2 3D Model of Foundation Pit

1.3 施工过程模拟

以基坑模型 A 为例,对基坑的开挖过程进行模拟:①整个土体模型进行初始地应力计算,将位移清零;②进行被动区加固并施工围护结构,将位移清零;③开挖 1 m;④在 -1 m 处架设首道支撑,继续开挖 9.5 m 到底。特别指出,为充分考虑软土基坑中支撑施工前基坑已发生变形的实际情况,开挖 1 m 后先进行模拟计算,而不是开挖 1 m 在 -1 m 处架设好支撑再计算,本文其他工况均按此原则进行模拟。

1.4 土体本构模型选择

摩尔-库仑本构模型(MC 模型)综合了胡克定律和 Coulomb 破坏准则,参数简单明确,在岩土工程数值计算中是应用最为广泛的模型,但这并不代表 MC 模型在所有岩土工程问题中都适用。MC 模型能较好地描述土体的破坏行为,在一些强度问题的研究中有较强的适用性,而对于基坑开挖,它不能较好地描述土体破坏前的应力-应变关系,无法区分加载和卸载,也不能考虑应力历史的影响^[17]。土体硬化模型可以克服 MC 模型的上述不足,能较好地模拟基坑开挖过程,描述基坑变形,已成为基坑工程数值分析中应用最多的模型之一^[18]。

FLAC 3D 软件中的土体硬化模型可选取塑性硬化模型(PH 模型),本文土体压缩模量 E_{50} 与土体硬化模型中的参考割线模量 E_{50}^{ref} 、参考切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、卸载再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 的比值硬土取 1:1:1:6,软土取 1:0.8:1:8,其他参数可按已有的研究经验取值^[19-20]。

为比选 MC 模型与 PH 模型,对基坑模型 A 中土体分别应用 MC 模型和 PH 模型进行模拟计算,以对比 2 种本构模型对工程实例变形描述的合理性。特别指出,对土体应用 MC 模型时,加固土体也可应用 MC 模型^[8];对土体应用 PH 模型时,加固土体也可采用 PH 模型,且各模量比例系数可与硬土取值一致^[21]。开挖至坑底时,基坑位移情况如图 3~5 所示。

可以看出,应用 PH 模型计算出的围护结构水平位移值与实测值拟合较好,对坑底隆起和坑外地表沉降的描述也较符合实际工程规律。MC 模型计算出的坑底隆起值约为 200 mm,坑外局部地表土体“鼓出”地面标高,显然有悖实际情况,这与 MC 模型不能区分加载和卸载的土体刚度有较大关联。考虑到坑底隆起和坑外沉降直接反映基坑开挖的土体位移情况,推测 MC 模型围护桩底位移过大的反

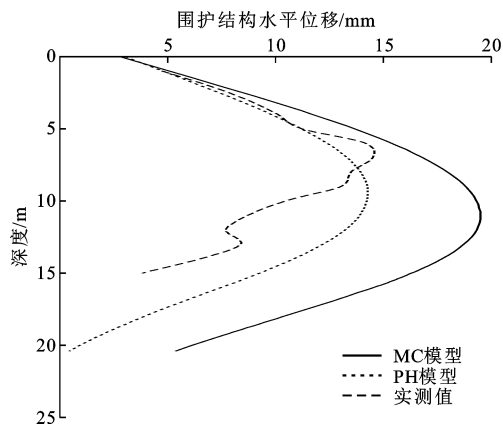


图 3 围护结构水平位移曲线

Fig. 3 Horizontal Displacement Curves of Retaining Wall

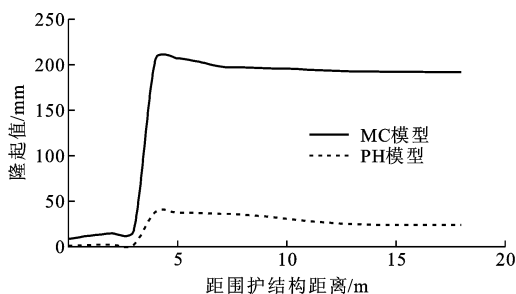


图 4 坑底隆起曲线

Fig. 4 Heave Curves of Bottom Ground

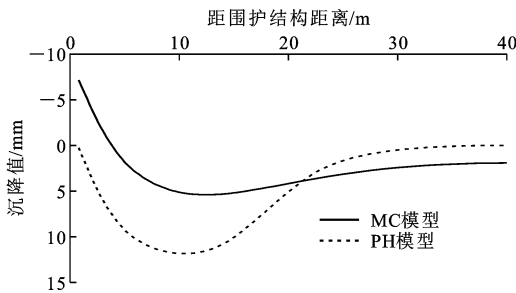


图 5 坑外地表沉降曲线

Fig. 5 Settlement Curves of Ground Surface

常情况是由于土体位移过大造成的。综上所述可以看出,在基坑工程的数值分析中,PH 模型有较强的适用性,MC 模型则应谨慎使用。

2 基坑底被动区加固效果

本节对基坑底裙边加固和满堂加固 2 种被动区加固形式的加固效果及规律进行探究,2 种加固形式示意图如图 6 所示。

2.1 基坑底裙边加固

基坑模型 B 坑底有厚达 9 m 的淤泥,对其进行坑底裙边加固,分别保持加固深度 8 m 不变调整加固宽度以及保持加固宽度 8 m 不变调整加固深度,加固效果如图 7,8 所示。

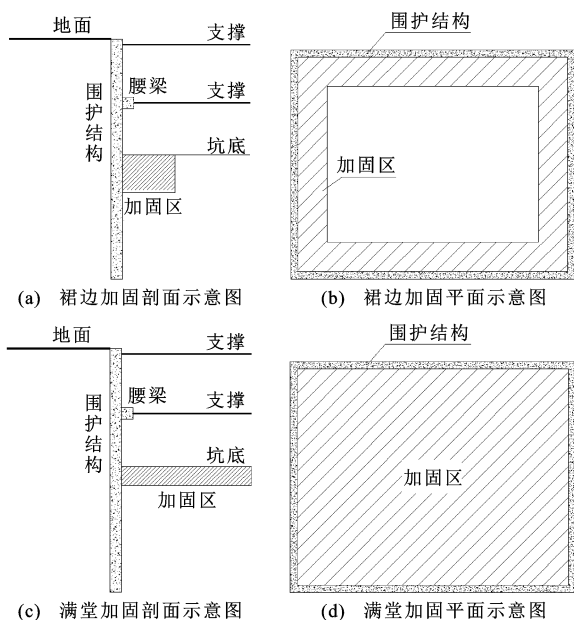


图6 被动区加固示意图

Fig. 6 Sketches of Passive Zone Reinforcement

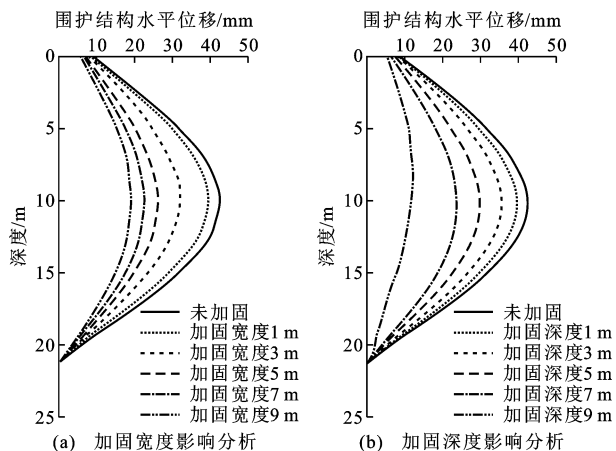


图7 裙边加固宽度和深度对围护结构水平位移的影响

Fig. 7 Influence of Skirt Edge Reinforcement Widths and Depths on Horizontal Displacements of Retaining Wall

从图7(a),8(a)中可以看出,保持加固深度8 m不变时,围护结构水平位移和坑外地表沉降在加固宽度1~5 m的减少值明显大于加固宽度5~9 m的减少值。将基坑开挖深度记为 h ,本基坑模型 $h=10$ m,即可以确定基坑模型B裙边加固的合理加固宽度为 $0.5h$,这与基坑模型A合理加固宽度的规律^[16]基本一致。

关于合理加固深度,文献^[16]得到基坑模型A合理加固深度取 $0.5h\sim0.6h$ 的结论。对于基坑模型B,从图7(b),8(b)中可以看出,当加固深度达9 m时加固效果陡增,这是因为加固深度达9 m时加固范围已覆盖坑底全部软土,加固土已接触到强风

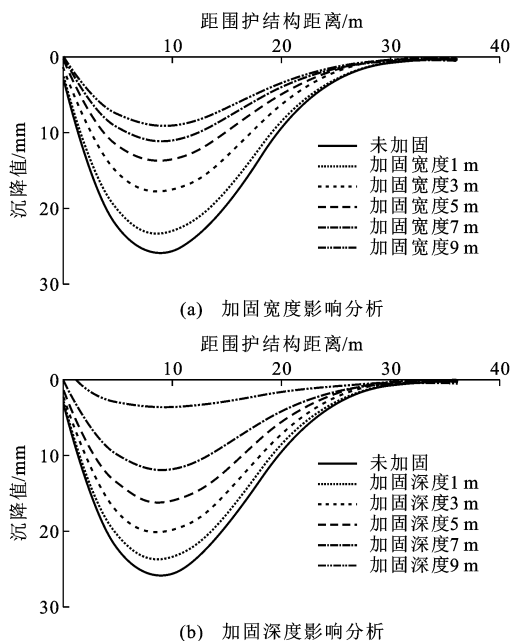


图8 裙边加固宽度和深度对基坑外地表沉降的影响

Fig. 8 Influence of Skirt Edge Reinforcement Widths and Depths on Surface Settlements Outside Foundation Pit

化泥质粉砂岩,与底面接触淤泥相比,摩擦力大大提高,故变形控制效果陡增。加固深度为1~7 m时,在1~5 m范围内位移控制程度逐渐增加,但加固深度5~7 m对围护结构水平位移的减少量已小于加固深度3~5 m时对应的减少量,坑外地表沉降值的减少量则已差不多,均没有继续增加的趋势,仍可见5 m处有拐点。因此可以得出裙边加固的合理加固深度可取 $0.5h\sim0.6h$,但加固深度的变形控制效果与坑底的土层情况密切相关,裙边加固深度应尽量覆盖坑底软土层。

2.2 基坑底满堂加固

对基坑模型B分别进行深度1~5 m的满堂加固,如图9,10所示。由图9,10可以看出,加固深度大于3 m后,围护结构水平位移及坑外地表沉降的控制效果均明显减弱,由此得到满堂加固的合理加固深度为 $0.3h$ 。

2.3 裙边加固与满堂加固的对比

在得到裙边加固和满堂加固合理加固参数的基础上,分别对基坑模型B(开挖深度10 m)和基坑模型C(开挖深度15 m)以2种加固方式的合理加固参数进行加固,将围护结构最大水平位移和坑外地表最大沉降的模拟结果统计在表4中。

由2个模型的加固效果综合来看,在深厚软土基坑工程中取合理加固参数进行加固时,裙边加固

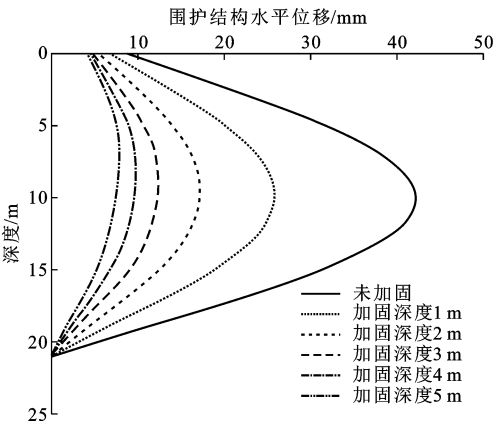


图9 满堂加固深度对围护结构水平位移的影响

Fig.9 Influence of Full Pit Bottom Reinforcement Depths on Horizontal Displacements of Retaining Wall

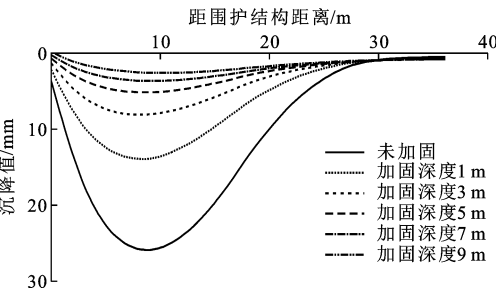


图10 满堂加固深度对基坑外地表沉降的影响

Fig.10 Influence of Full Pit Bottom Reinforcement Depths on Surface Settlements Outside Foundation Pit

表4 位移控制效果对比

Table 4 Comparison of Displacement Control Effect				
基坑模型 编号	加固类型	加固范围	最大位移/mm	控制效 果/%
B	未加固		水平位移:42.23	
			地表沉降:25.86	
C	未加固		水平位移:82.02	
			地表沉降:49.66	
B	裙边加固	深6 m,宽6 m	水平位移:30.48	27.8
			地表沉降:16.93	34.5
C	裙边加固	深8 m,宽8 m	水平位移:61.70	24.8
			地表沉降:32.38	34.8
B	满堂加固	深3 m	水平位移:12.55	70.3
			地表沉降:4.37	83.1
C	满堂加固	深5 m	水平位移:29.12	64.5
			地表沉降:7.17	85.6

对围护结构最大水平位移的控制约为 25%，满堂加固约为 65%，裙边加固对坑外地表最大沉降值的控制约为 35%，满堂加固约为 80%。满堂加固的位移控制效果明显强于裙边加固，实际工程应根据基坑尺寸、开挖深度、需要的控制程度等来合理选择加固

形式。

特别指出，合理加固范围仅代表加固效果幅度减弱的拐点，超过合理加固范围基坑底被动区加固的变形控制作用仍将继续发挥。

3 开挖段超前加固应用分析

3.1 严格变形条件下的开挖段超前加固分析

在一些软土基坑工程中，若周围紧邻重要的建(构)筑物，则需要严格控制基坑变形，此时可首选满堂加固。

对基坑模型 C(开挖深度 $h=15\text{ m}$) 进行满堂加固，围护结构水平位移如图 11(a)所示。可以看出，加固效果的拐点发生在加固深度 4~6 m 处，验证了满堂加固合理深度 $0.3h$ 的结论。为进一步控制变形，需增加加固深度，当超过 $0.5h$ (深度 8~12 m) 后，最大水平位移从坑底以下位置上移到最后一道撑至坑底的区域，此时考虑对此区域进行超前加固。

图 11(b)展示了 2 种加固方案开挖到底时的围护结构水平位移曲线，一种方案为坑底 12 m 加固，另一种方案则把其中的 4 m 置于最后一道撑至坑底区域，即坑底加固 8 m 和开挖段超前加固 4 m，超前加固示意图如图 12 所示。两者最大位移分别为 16.49 mm 和 14.18 mm，表明开挖段超前加固比坑底加固更有效。此外，虽然开挖至坑底时超前加固部分已被挖除，但坑底以上围护结构水平位移较只有坑底加固的情况仍整体减小，这是超前加固在最后一道撑以上土体开挖过程中变形控制的累加效果造成的。

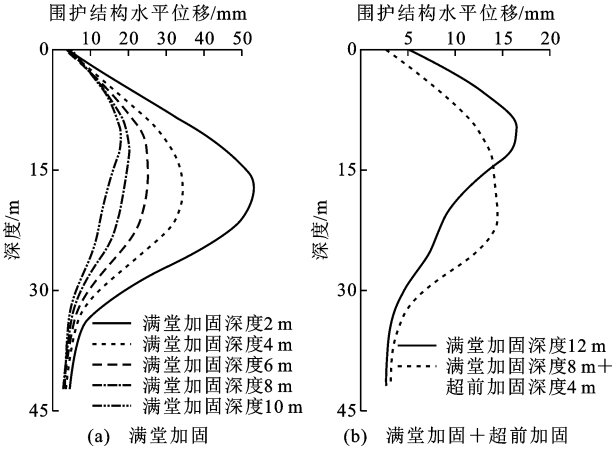


图11 超前加固对围护结构水平位移的影响

Fig.11 Influence of Reinforcement Before Excavation on Horizontal Displacement of Retaining Wall

综上，满堂加固深度超过 $0.5h$ 后，可优先考虑超前加固最后一道撑至坑底范围的土体。

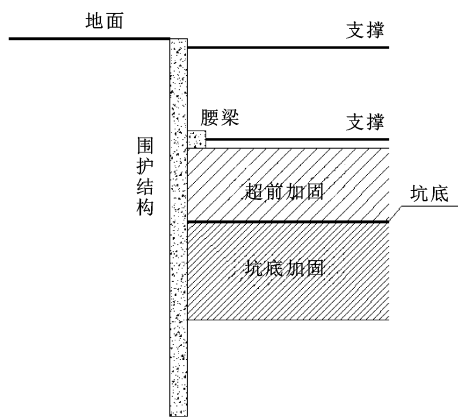


图 12 超前加固示意图

Fig. 12 Sketch of Reinforcement Before Excavation

3.2 超前加固下的首道撑下移分析

在围护结构+内支撑形式的基坑工程中,靠近桩顶处土压力很小,但首道撑通常设置在地面标高 0 m 或 -1 m 的位置,这主要是因为基坑初始开挖时顶部如果没有支撑会形成围护结构悬臂状态,很容易造成桩顶位移过大。超前加固为首道撑下移、减少一道支撑的设计提供了可行方案。

下面对比 2 种方案:方案 1 基坑模型 C 改为 2 道支撑,分别设置在 -3.5 m 和 -10.5 m 的位置,采用 5 m 坑底满堂加固,以及首道撑下 1.5 m (-4~-5.5 m)的开挖段满堂形式的超前加固;方案 2 基坑模型 C 坑底 5 m 满堂加固,按原设计实施 3 道支撑。开挖过程模拟时,每次开挖至下一道支撑下平面处或坑底处。因此方案 1 的开挖模拟过程分 3 步,分别为 Step1 挖至第 1 道支撑下,Step2 设置第 1 道支撑并挖至第 2 道支撑下,Step3 设置第 2 道支撑并开挖到底。相应地,方案 2 有 3 道支撑,故有 4 个开挖步骤。2 种方案各开挖步下的围护结构水平位移如图 13 所示。

通过超前加固,方案 1 第 1 步开挖至 -4 m 时,桩顶位移仅为 11.09 mm,开挖到底时,围护结构最大水平位移为 29.14 mm,方案 2 则为 29.12 mm,开挖过程中围护结构桩顶位移的控制以及开挖到底的最大侧移控制均证明了减撑方案的可行性。

依据工程经验,分别以 $300 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1600 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 估算本模型水泥搅拌桩施工和支撑施工的成本,首道撑下 1.5 m 超前加固造价约为 100 万元,减少的首道撑造价约为 60 万元,虽然建设造价有所增加,但可减少首道撑的拆除及废料处理费用,同时开挖段超前加固不占用额外工期,这意味着在工期上可节省出首道支撑的支模、浇筑、养护及后续拆撑

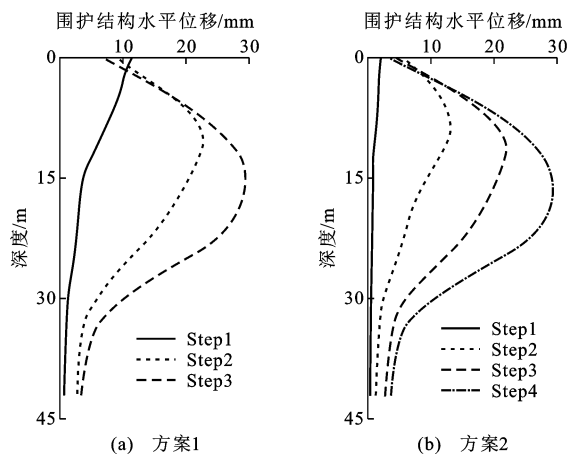


图 13 各开挖步下围护结构水平位移曲线

Fig. 13 Horizontal Displacement Curves of Retaining Wall in Different Steps

的时间。

在珠海等地区,常见地表 3~4 m 填土下分布深厚淤泥的地质,此时在填土下进行超前加固,既可以使首道撑下移作减撑设计,又可以为首层土开挖、首道撑(下移后的)架设施工提供便利,对坑内立柱桩因软土开挖易造成的侧向偏移问题也将大为改善,该方法配合施工方案可发挥更大的综合作用。

4 结 语

(1)硬化模型能描述土体非线性关系,区分加载卸载,考虑土体硬化等因素,比摩尔-库仑模型在基坑变形的描述上更加合理,在基坑工程中具有更强的适用性。

(2)裙边加固的合理加固宽度可取 $0.5h$,合理加固深度可取 $0.5h \sim 0.6h$,但加固深度与坑底地层密切相关,坑底如有软土,加固深度应尽量覆盖软土层。

(3)满堂加固合理加固深度可取 $0.3h$,需要进一步控制基坑位移时可增加满堂加固深度,加固深度超过 $0.5h$ 后,应优先考虑加固最后一道撑到坑底的土体。

(4)软土深基坑以本文中总结的合理加固参数进行加固时,裙边加固对围护结构最大水平位移的控制约为 25%,满堂加固约为 65%,裙边加固对坑外地表最大沉降值的控制约为 35%,满堂加固约为 80%,可为基坑设计提供参考。

(5)开挖段超前加固为首道撑下移、减少支撑的设计方式提供了可行方案,配合施工方案可发挥最大效用。

参考文献:

References:

- [1] 孙剑平,邵广彪,江宗宝.深厚杂填土基坑位移控制设计与施工技术[J].岩土工程学报,2012,34(增1):576-580.
SUN Jian-ping,SHAO Guang-biao,JIANG Zong-bao. Design and Construction Technology of Displacement Control in Deep Miscellaneous Fill Foundation Pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012,34(S1):576-580.
- [2] 张宇捷,李俊才,陈志宁,等.软土基坑中被动区加固对周围环境的影响[J].施工技术,2009,38(11):91-93.
ZHANG Yu-jie, LI Jun-cai, CHEN Zhi-ning, et al. Effect of Passive Zone Reinforcement on Surrounding Environment in Soft Soil[J]. Construction Technology, 2009,38(11):91-93.
- [3] 邸国恩,黄炳德,王卫东.敏感环境条件下深基坑工程设计与实践[J].岩土工程学报,2010,32(增1):383-387.
DI Guo-en, HUANG Bing-de, WANG Wei-dong. Design and Application of the Deep Excavation in Sensitive Environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010,32(S1):383-387.
- [4] 张吉纯.临近地铁深基坑变形控制措施研究[J].安徽建筑,2019,26(3):86-87,111.
ZHANG Ji-chun. Research on Deformation Control Measures of Deep Foundation Pits Near Subway[J]. Anhui Architecture, 2019,26(3):86-87,111.
- [5] 陈 赓,罗文艺.淤泥质条件下狭长形深基坑的支护与开挖施工技术[J].建筑施工,2019,41(10):1787-1789.
CHEN Yi, LUO Wen-yi. Support and Excavation Construction Technology of Narrow and Long Deep Foundation Pit Under Silt Conditions[J]. Building Construction, 2019,41(10):1787-1789.
- [6] 杨福庆.中保澳琴广场基坑工程悬臂桩+被动区坑底加固技术的探讨[J].西部探矿工程,2018,30(7):8-11,18.
YANG Fu-qing. Discussion on Technology of Cantilever Piles and Reinforcement of Passive Zone in Foundation Pits of Zhongbaoao Square[J]. West-China Exploration Engineering, 2018,30(7):8-11,18.
- [7] 马海龙.基坑被动区加固对支护影响的研究[J].岩土工程学报,2013,35(增2):573-578.
MA Hai-long. Influence of Excavation Passive Zone Reinforcement on Bracings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013,35(S2):573-578.
- [8] 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,2010,29(5):1042-1051.
ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun, DING Lie-yun, et al. Displacement Control Effects and Parameter Analysis of Passive Zone Improvement of Foundation Pits[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010,29(5):1042-1051.
- [9] 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.
- [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 Chun-bao, GAO Peng, TIAN Li-yun, 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.
- [11] 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 Zhi-jun, 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.
- [12] 蒋建平.深基坑坑底加固体的刚度效应研究[J].工程力学,2011,28(6):130-140.
JIANG Jian-ping. Study on Stiffness Effect of Reinforcement Mass in Bottom of Deep Excavation[J]. Engineering Mechanics, 2011,28(6):130-140.
- [13] 怀文卫,孙洋波.被动区加固在逆作法基坑开挖中的应用研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(3):508-512,577.
HUAI Wen-wei, SUN Yang-bo. Research on Ground Improvement in Passive Zone of Soft Clay Excavation with Top-down Construction Method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3):508-512,577.
- [14] 寿 旋,徐肖华,孙苗苗,等.软土地区深基坑被动土体加固高度改进研究[J].岩土工程学报,2010,32(增1):104-108.
SHOU Xuan, XU Xiao-hua, SUN Miao-miao, et al. Reinforcement Height of Passive Zone of Deep Foun-

- dation Pits in Soft Clay Regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 104-108.
- [15] 李志伟,侯伟生,叶爱丽,等. 深基坑开挖段被动区加固的位移控制效果分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增1): 621-627.
- LI Zhi-wei, HOU Wei-sheng, YE Ai-li, et al. Displacement Control Effect of Passive Zone Improvement at Excavation Section of Deep Foundation Pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 621-627.
- [16] 林树周. 深厚软土地区基坑支护的被动区加固效果研究[D]. 广州: 广州大学, 2015.
- LIN Shu-zhou. Research of Retaining Wall Reinforced in the Passive Zone of Deep Soft Soil Foundation Pit [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2015.
- [17] 徐中华,王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-264, 326.
- XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of Soil Constitutive Models for Numerical Analysis of Deep Excavations in Close Proximity to Sensitive Properties [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258-264, 326.
- [18] 王卫东,王浩然,徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.
- WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental Study of Parameters of Hardening Soil Model for numerical Analysis of Excavations of Foundation Pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290.
- [19] 段尚磊. 珠海某软土深基坑裙边加固工程效应数值模拟分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- DUAN Shang-lei. Numerical Simulation Analysis of Reinforcement Effects of Skirt Border Improvement for a Soft Soil Foundation Pit in Zhuhai[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [20] SURARAK C, LIKITLERSUANG S, WANATOWSKI D, et al. Stiffness and Strength Parameters for Hardening Soil Model of Soft and Stiff Bangkok Clays [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(4): 682-697.
- [21] 刘溢,李镜培,陈伟. 被动区深层搅拌桩加固对超大深基坑变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增1): 465-469.
- LIU Yi, LI Jing-pei, CHEN Wei. Effect of Reinforcement of Deep Mixing Piles on Deformation of Ultra-deep Excavations in Passive Zone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 465-469.