

王永锋, 杜军, 王利民, 等. 基坑被动区加固对基坑支护体系变形和桩后土体沉降的影响[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 121–127. [WANG Yongfeng, DU Jun, WANG Limin, et al. Effect of Passive Zone Reinforcement on Deformation of Foundation Pit Supporting System and Soil Settlement Behind Piles [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 121–127]

基坑被动区加固对基坑支护体系变形 和桩后土体沉降的影响

王永锋, 杜军, 王利民, 郑志聪, 鲜东云, 虞亚平, 郭逢波, 孔剑捷

(中国建筑第五工程局有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要: 深厚软土地区基坑常用基坑被动区加固的方法来控制支护体系变形。以珠海深厚软土地区某基坑工程为例, 采用FLAC^{3D}软件, 建立了基坑工程分析模型, 计算分析了被动区土体加固深度及加固宽度对基坑支护体系变形和桩后土体沉降的影响。计算结果表明, 随着被动区加固深度和加固宽度的增加, 桩身位移量和桩后土体沉降量均逐渐减小; 桩身位移量和土体沉降量的减幅随着加固深度和加固宽度的增加而逐渐减小, 故加固区存在最优加固深度和加固宽度, 分别为10 m和12 m左右; 桩后土体沉降影响区域范围为 $2H$, 坑外地表最大沉降点在距围护桩 $0.5H$ 处。

关键词: 软土; 被动区加固; 基坑支护; 加固深度; 加固宽度

中图分类号: TU753

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0121-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.17

Effect of Passive Zone Reinforcement on Deformation of Foundation Pit Supporting System and Soil Settlement Behind Piles

WANG Yongfeng, DU Jun, WANG Limin, ZHENG Zhicong, XIAN Dongyun,
YU Yaping, GUO Fengbo, KONG Jianjie

(China Construction Fifth Engineering Bureau Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: The passive reinforcement method of foundation pit in deep soft soil area is often used to control the deformation of supporting system. In this paper, taking a foundation pit project in deep soft soil area of Zhuhai as an example, using FLAC^{3D} software, the foundation pit engineering analysis model is established, and the

收稿日期: 2021-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678352)

作者简介: 王永锋(1977-), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事土木工程管理及土木工程施工方面研究。

E-mail: 13527257618@163.com

通信作者: 杜军(1997-), 男, 助理工程师, 学士, 主要从事土木工程管理及土木工程施工方面研究。

E-mail: 1043381513@qq.com

influence of reinforcement depth and reinforcement width in passive area on the deformation of foundation pit supporting system and soil settlement behind piles is calculated and analyzed. The results show that with the increase of reinforcement depth and reinforcement width in passive zone, the displacement of pile and the settlement of soil behind pile decrease gradually. The reduction of pile displacement and soil settlement decreases gradually with the increase of reinforcement depth and reinforcement width, so there is an optimal reinforcement depth and reinforcement width, which are about 10 m and 12 m, respectively. The influence area of soil settlement behind the pile is $2H$, and the maximum surface settlement point outside the pit is $0.5H$ away from the retaining pile.

Keywords: Soft soil; Passive zone reinforcement; Foundation pit support; Reinforcement depth; Reinforcement width

0 引言

珠海等沿海软土地区深基坑工程的围护结构常会在开挖过程中出现变形过大的现象^[1-2]。这是因为基坑开挖改变了原土层的应力场,导致土体产生变形^[3]。珠海地区多为淤泥质土,由于这类土具有高压缩性和低强度的特点,因此基坑会产生较大变形^[4]。软土地区基坑被动区的抵抗力不足,并且开挖结束至围护结构养护完成需要一定的工期,在这一过程中围护结构不可避免地会出现过大变形,这严重威胁了基坑安全^[5]。围护结构变形过大有很大的危害性,软土地区围护结构位移过大会导致基坑塌陷和周边土层位移过大,从而造成地下管线断裂、周边建筑出现裂缝和沉降等问题^[6]。

基坑被动区加固技术可以很好的改良坑底土体的物理性质,增加被动区的抵抗力,减小土体卸载所导致的变形,起到减少支护结构内力、水平位移和围护桩后土体沉降的效果^[7]。影响被动区加固效果的两个重要因素分别为加固深度及加固宽度,国内外许多学者对此进行了一系列研究。马郢^[8]运用有限元分析软件,研究了不同加固形式对基坑变形的影响。刘溢等^[9]对位于深厚软土中的基坑进行了不同范围的被动区压浆加固,研究发现随着加固深度增大,基坑底隆起量、基坑周边沉降、墙体的水平位移、内支撑的轴力均明显减少。韩映忠等^[10]将有限元模拟分析与现场实测数据对比,研究结果表明被动区加固深度和加固宽度存在临界值。有些研究^[11]认为加固效果由加固宽度控制,加固宽度越大加固效果越好;而有的研究^[12]则认为加固范围并非

越大越好,存在最优的加固范围。

基坑坑内土体加固可有效减少基坑支护结构的变形,但坑内加固的深度及宽度如何确定没有明确的计算公式,是一个值得研究的方向^[13]。基坑工程技术规范规定^[14],加固体的宽度不宜小于基坑开挖深度的0.4倍,并不宜小于4 m,深度不宜小于3 m。实际工程中,加固范围决定了加固成本,合理的加固范围可以使项目在有限的成本下获得最好的加固效果。本文就混凝土灌注桩支挡式结构中的加固区深度及加固区宽度对基坑支护特性的影响进行了研究,比较了不同加固深度和宽度的组合对基坑围护桩变形、坑外地表沉降的影响。

1 工程背景

某实际工程位于广东省珠海市横琴新区,原始地貌属滨海平原,淤泥深厚。基坑南侧是环岛北路,基坑距离电缆沟最近处仅为1.27 m,平行于基坑走向。由表1知,淤泥土层厚达28 m,强度低、压缩性大,即使基坑本身安全,如果基坑变形过大,也会导致南侧临水基坑止水帷幕开裂而造成透水事故。另外,基坑西侧变形过大,也可能导致排水管道断裂、路面下沉等现象。

该基坑开挖深度为11.5 m,放坡高度为4 m,采用双排桩进行支护,内设一道钢筋混凝土水平支撑。由于变形控制严格,坑内采用三轴搅拌桩进行加固,以此来改善围护结构受力,减少基坑变形量。基坑开挖面积大,坑内加固工程量也直接影响着工程造价,因此确定合理的加固深度与加固宽度十分重要。

表1 地层参数表
Table 1 Strata parameters table

序号	土层名称	层厚/m	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$c/(\text{kPa})$	$\varphi/(^{\circ})$	泊松比	$E_s/(\text{MPa})$
1	素填土	1.8	17.8	8.0	6.0	0.44	4.3
2	淤泥	28.0	17.0	4.8	2.8	0.48	1.8
3	淤泥质土	3.7	17.1	7.2	5.8	0.42	2.5

2 计算模型及计算内容

2.1 坑底加固体力学参数

被动区采用三轴搅拌桩加固，以水泥作为固化剂，经过搅拌和化学反应后，坑底原状土体变为具有一定强度的加固土桩体。由于加固后土体强度、刚度提高，在模拟基坑开挖时，坑底加固体按强度等效法等效为原状土与水泥土的均匀复合体计算。

工程采用普通硅酸盐水泥三轴搅拌桩对坑底进行加固，且无侧限抗压强度要求(0.8~1.2) MPa。考虑到可能受施工质量的影响，本文取水泥土无侧限抗压强度 $q_u=1.0$ MPa，并取 $E_{50}=120 q_u$ 。由于坑底土主要为淤泥土，根据《基坑工程手册》^[15]取水泥土内摩擦角 $\varphi=30^{\circ}$ ，粘聚力 $c=200$ kPa。

加固体计算参数均按照加固等效公式确定， m 为加固体面积置换率，可求得 $m=0.4$ 。模型中加固体具体参数如表2所示。

$$P_e = mP_j + (1 - m) P_s \tag{1}$$

式中， P_e 为加固体计算参数， P_j 为水泥土物理力学参数， P_s 为坑底软土物理力学参数。

表2 加固材料参数

Table 2 Reinforcement material parameters

材料参数	取值
m	0.4
$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	17
μ	0.25
E/MPa	49
c/kPa	84
$\varphi/(^{\circ})$	30

2.2 模型设置

本文采用FLAC^{3D}软件进行计算分析，基坑支

护剖面图见图1。本基坑采用双排桩支护，排距为6 m，前排桩桩直径1.4 m，桩间距1.6 m，桩长36 m；后排桩桩直径1.2 m，桩间距8 m，桩长34 m。采用弹性模型，弹性模量30 GPa，泊松比0.2。

基坑设一道钢筋混凝土水平内支撑，主撑的水平间距为8.5 m，支撑截面为1×1 m，采用弹性模型，弹性模量取26 GPa，泊松比取0.2。

土体及加固体采用Mohr-Coulomb弹塑性模型，土层计算参数按照表1选取。坑内加固采用三轴搅拌桩，加固形式为格栅式加固，水泥土重度19.0 kN/m³，黏聚力35 kPa，内摩擦角25°，变形模量500 MPa，基坑坑顶作用均布荷载取20 kPa。

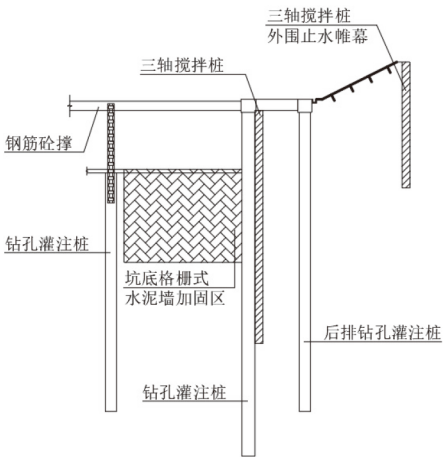


图1 基坑支护剖面图

Fig.1 Profile of foundation pit support

另外，由于摩擦效应的影响，桩和周边土的实际变形并不是同步发生的，为了减小误差，使计算结果更准确，可在桩土之间设置接触单元。界面黏聚力及界面摩擦角应在计算中进行适当折减，取相邻土体黏聚力和内摩擦角的0.65倍，界面的法向刚度及切向刚度可按式(2)确定，其具体参数属性见表3。

$$k_n = k_s = 10\max(\frac{K + 4G/3}{\Delta s_{\min}}) \tag{2}$$

由于该基坑变形控制要求高，应采用坑内被动区土体加固的方式进行加固，为了更好的确定

工程加固效果，本文以 2 m 为梯度确定不同的加固宽度和深度，如表 4 所示，共设置 16 个工况。

表 3 桩土接触单元
Table 3 pile-soil contact unit

名称	取值
法向径度系数	6.2×10^5
切向径度系数	5.8×10^4
黏聚力	6.5
内摩擦角	6.5

表 4 试验工况表
Table 4 Test condition table

加固深度/m	加固宽度/m			
	8	10	12	14
6	1	2	3	4
8	5	6	7	8
10	9	10	11	12
12	13	14	15	16

图 2 为 FLAC^{3D} 中的模型图，为了方便计算，本文建模时作了如下假设：①地表和土层均呈水平状分布；②不考虑冠梁的作用，排桩桩顶按照自由端约束条件考虑；③不考虑基坑开挖的过程。

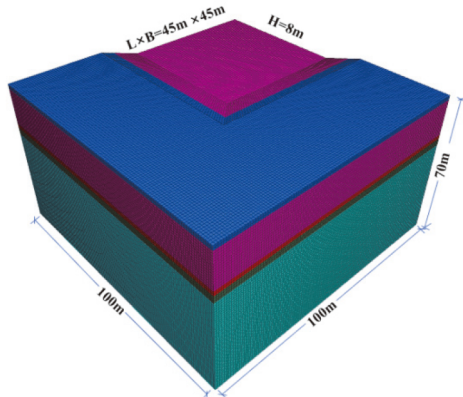


图 2 FLAC^{3D} 模型图
Fig.2 FLAC^{3D} model diagram

3 计算分析

3.1 加固深度对桩身水平位移影响

图 3 为开挖至坑底时，被动区加固深度对前排桩桩身水平位移的影响曲线。由图可知，桩身的最大水平位移在基坑底约 8 m 处，随着加固深度的增大，围护桩侧向变形逐渐减小，围护桩的侧向

变形曲线呈“内凸”形。由于内支撑和强风化花岗岩对支护桩桩顶和桩底有约束作用，围护桩桩底无踢脚现象，其破坏由支护桩桩身强度和变形控制。

从图 3 中可以看出，桩身水平位移随着被动区加固深度的增大而减小，增大被动区加固深度可有效减小支护桩在基坑开挖段内的水平位移。在加固宽度为 12 m 的情况下，加固深度从 6 m 增加到 12 m 过程中，深度每增加 2 m，桩身最大位移减少量分别为 8.3 mm、4.5 mm、2mm，对应的减幅为 30.2%、16.4%、7.2%。加固深度对桩顶位移影响也很较大，在加固宽度为 12 m 的情况下，加固深度从 6 m 增加到 12 m 过程中，深度每增加 2 m，桩顶位移减少量分别为 7.4 mm、3.9 mm、1.6 mm，对应的减幅为 41.1%、21.6%、8.9%。

加固深度从 6 m 增加到 10 m 的过程中，桩身最大位移和桩顶位移减幅较大，当加固深度超过 10 m 时，继续增加加固深度对控制围护桩侧向变形影响不再显著增加，这说明存在控制围护桩侧向变形的最优加固深度，大于该深度后，加固深度不再是控制围护桩侧向变形的主要因素。因此，本案例被动区最优加固深度约为 10 m。

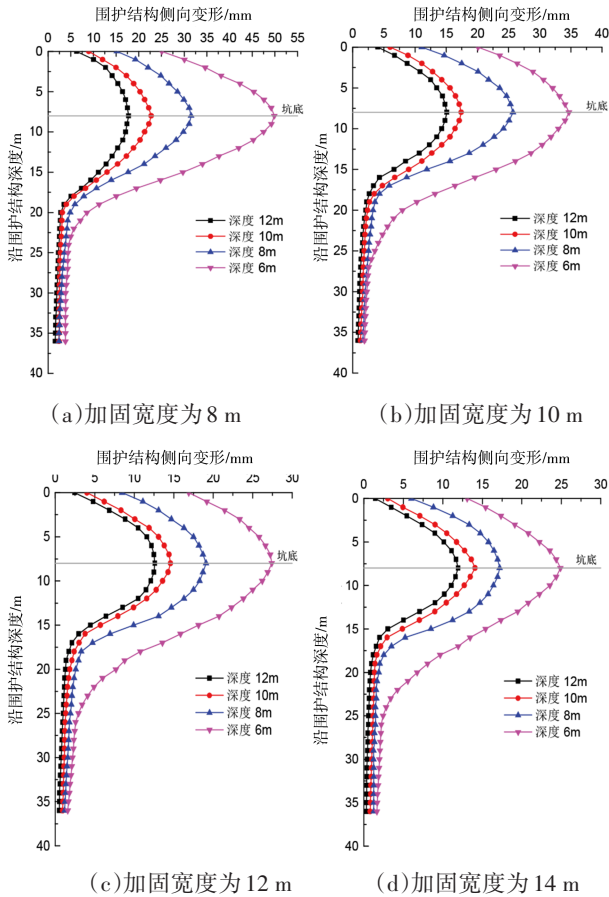


图 3 不同加固深度下围护桩变形曲线
Fig.3 Deformation curve of retaining pile under different reinforcement depths

3.2 加固宽度对桩身水平位移影响

图4为基坑被动区加固宽度对前排桩桩身水平位移的影响曲线。在加固深度为10 m的情况下,加固宽度从8 m增加到14 m,宽度每增加2 m,桩身最大位移减少量分别为5.1 mm、2.8 mm、0.5 mm,桩身最大位移量减幅分别为22.6%、12.4%、2.2%。加固宽度对桩顶位移影响也很明显。在深度为10 m的情况下,加固宽度从8 m增加到14 m,宽度每增加2 m,桩顶位移减少量分别为2.9 mm、2.2 mm、0.8 mm,桩顶位移减幅分别为32.2%、24.4%、8.9%。

加固宽度从8m增长到12 m的过程中,桩顶位移和桩身水平位移减幅都较大,增大被动区加固宽度能有效减小支护桩的最大水平位移和桩顶位移。但当加固宽度超过12 m后,增大被动区加固宽度对支护桩最大水平位移影响不明显。这说明存在控制围护桩侧向变形的最优加固宽度,大于该宽度后,加固体的作用无法充分发挥,使得经济上不合理。因此,本案例被动区最优加固宽度约为12 m。

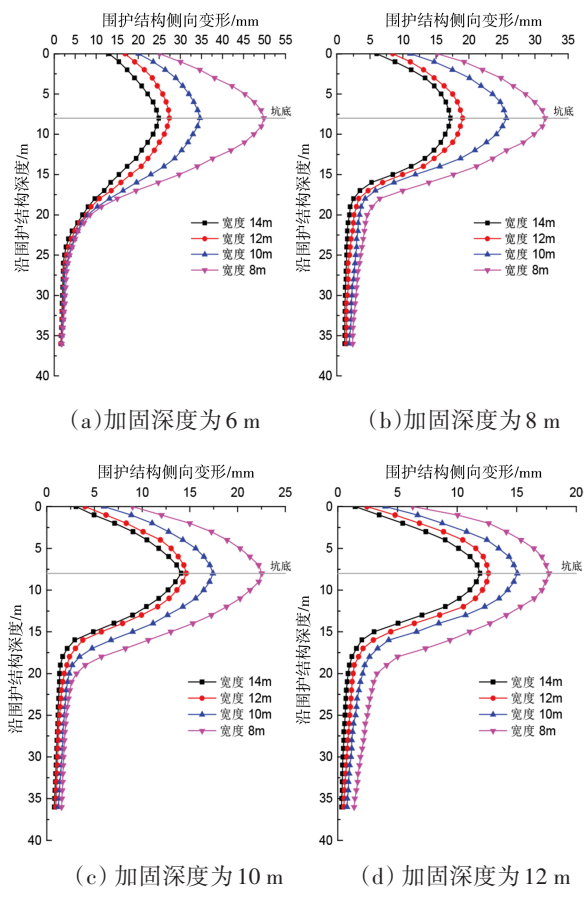


图4 不同加固宽度下围护桩变形曲线
Fig.4 Deformation curves of retaining piles under different reinforcement widths

3.3 加固深度对抗外土体变形影响

基坑支护不仅要保证基坑本身的安全与稳定,还要控制基坑周围土层的变形。深基坑施工会引起原场地地层的移动,围护结构侧向变形会引起土体侧移和沉降,如果控制措施不合理,就会使周边建构筑物产生裂缝,影响其正常使用,因此控制坑外地表变形至关重要。

图5为不同加固深度下,基坑开挖至坑底时坑外地表沉降曲线。由图5可知,沉降曲线呈“凹槽”状,随着加固区范围的增加,最大沉降量逐渐减小,但沉降区域影响范围和坑外地表最大沉降点依旧分别保持在距离围护桩2 H和0.5 H处。

由图可以看出,坑外地表沉降曲线受加固体深度变化影响明显。宽度在8 m、10 m、12 m、14 m的4种情况下,加固深度从6 m增加到12 m,对应的沉降量分别减小了22.3 mm、13.8 mm、5.2 mm、4.6 mm,对应的减幅分别为65.1%、59.2%、37.0%、32.1%。这说明加固体深度对抗外地表变形有较大影响,增加土体加固深度可以减小基坑外土体沉降量。

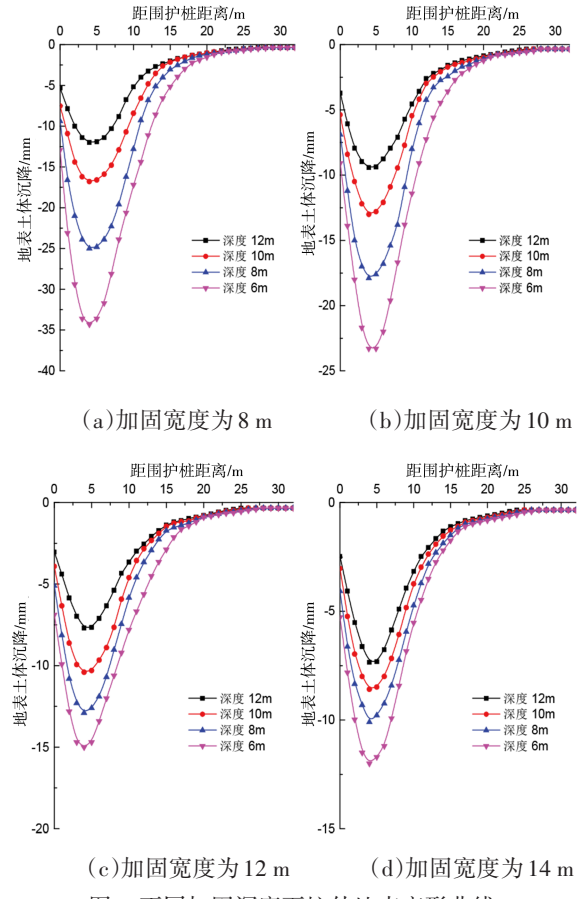


图5 不同加固深度下坑外地表变形曲线
Fig.5 Surface deformation curves outside the pit with different reinforcement depths

引起挡土结构外侧地面沉降主要原因有两种,一是挡土结构在主动土压力的作用下向基坑内产生挠曲,土体向坑内方向移动产生沉降;二是软土地区挡土墙嵌固深度不足,坑内土体隆起,坑外地面出现沉降。对于本工程,钻孔灌注桩穿过深厚软土层,桩端嵌固在岩层,故引起挡土结构外侧沉降的主要原因是挡土结构侧移导致坑外土体发生沉降。坑内加固可以有效减小围护桩的桩身侧向变形,间接影响了桩后土体发生沉降。故增加坑内加固深度,可以有效减少围护桩桩身变形量和桩顶位移值,从而有效减少桩后土体沉降量。

3.4 加固宽度对抗外土体变形影响

图6为不同加固宽度下,基坑开挖至坑底时坑外地表沉降曲线。由图可知,随着加固宽度的增加,基坑外地表沉降量逐渐减小。加固深度为6 m、8 m、10 m、12 m的4种情况下,加固宽度从8 m增加到14 m,对应的沉降量分别减小了22.1 mm、14.9 mm、8.2 mm、4.6 mm,对应的减幅分别为64.6%、59.6%、49.1%、38.3%。这说明土体加固宽度对抗外地表变形的影响较大。分析其原因,主要是因为坑外地表沉降的诱发因素是基坑围护桩侧向变形,而增加加固体宽度可以直接控制围护桩侧向变形,间接影响到坑外地表变形。故增加土体加固宽度可以明显减小基坑外土体沉降量。

4 结论

本文结合珠海地区某一典型基坑工程,采用FLAC^{3D}软件进行计算,就软土地区基坑被动区加固范围对围护结构变形的影响进行了分析,讨论了加固区域的深度、宽度对支护结构位移和桩后周边土体沉降量的影响,得出结论如下:

(1)随着加固深度和加固宽度的增加,围护桩最大侧移值和桩顶位移值均逐渐减小,这有助于基坑变形控制,也有助于减小围护桩后土体沉降。

(2)加固深度存在最优范围,在本例中,加固深度取值应该在10 m左右,加固宽度取值应该在12 m左右。

(3)在不同的加固深度和加固宽度条件下,桩后土体沉降区域影响范围和坑外地表最大沉降点始终保持在距离围护桩 $2H$ 和 $0.5H$ 处。

(4)增加坑内土体加固范围能够有效控制围护

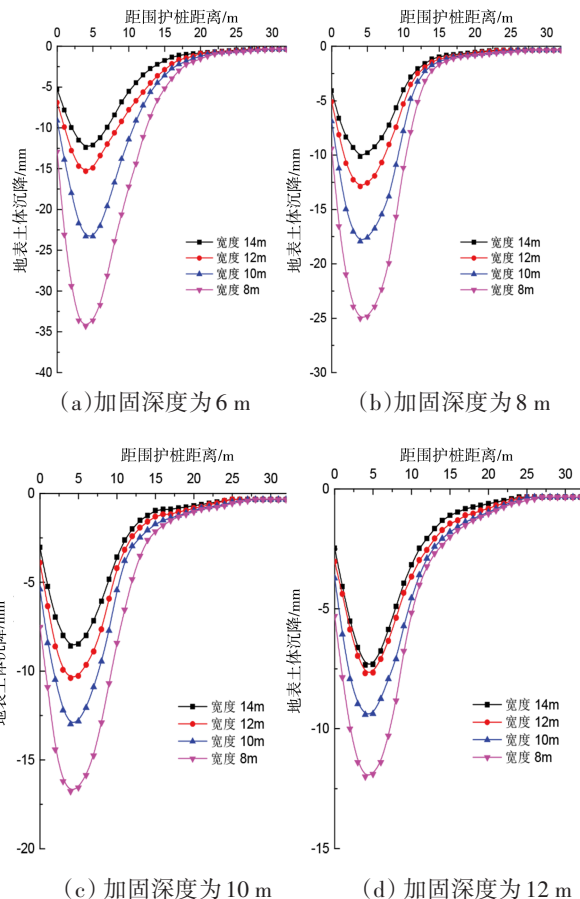


图6 不同加固宽度下坑外地表变形曲线

Fig.6 Surface deformation curves outside the pit with different reinforcement widths

结构位移,被动区加固对于减小基坑支护结构的水平位移及地面沉降效果十分显著。珠海地区的基坑工程应根据地质条件,选择合理的被动区加固宽度和深度,在合理造价范围内提高基坑的安全系数,控制基坑支护变形。

参考文献

- [1] 张玉成,杨光华,胡海英.珠三角深厚软土地区浅基坑支护若干问题探讨[J].岩土工程学报,2014,36(增刊):1-11.
- [2] 陈晓庆,丁文其,曲红波,等.珠海深厚淤泥地层中大直径桩插入比对基坑变形特性的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(09):2514-2524.
- [3] 鲁泰山,刘松玉,蔡国军,等.软土地层基坑开挖扰动及土体再压缩变形研究[J].岩土力学,2021,42(02):565-573+580.
- [4] 丁智,王达,王金艳,等.浙江地区软弱土深基坑变形特点及预测分析[J].岩土力学,2015,36(S1):506-512.
- [5] 段辉乐.坑内加固对基坑变形的影响研究[J].土工基础,2006,20(3):68-69.
- [6] 张艳军,王超雄,晏玲.被动区加固结合悬臂排桩在深基

- 坑中的应用[J]. 土工基础, 2010, 24(5): 7-10.
- [7] 李志伟. 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(增刊): 621-627.
- [8] 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(S1): 190-196.
- [9] 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(S1): 465-469.
- [10] 韩映忠, 林树周, 张占峰, 等. 深厚软土条件下被动区加固在深基坑工程的应用与数值分析[J]. 广州建筑, 2015, 43(06): 36-40.
- [11] 王欣, 谢康和, 张冬霖. 关于挡土结构被动区加固性状的若干研究[J]. 地基处理, 1999(3): 25-28.
- [12] 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.
- [13] 杨光华, 张文雨, 陈富强, 等. 软土基坑被动区土体不同加固宽度的 m 值计算方法研究[J]. 广东水利水电, 2020(02): 13-19.
- [14] 上海市勘察计行业协会. 基坑工程技术规范: —DG/TJ08-612010[S]. 上海: 上海市建筑建材市场管理总站, 2010.
- [15] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.