

DOI: 10.11779/CJGE2022S1036

偏压作用下坑底土体加固对围护墙变形特性的影响研究

周国强, 吴明明, 王晶, 顾文超, 徐启良, 方敏杰

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要: 依托杭州文一西路提升改造工程中的典型匝道基坑工程, 采用有限元方法, 针对偏压作用对基坑地连墙变形性状的影响, 分析了不同偏压条件下坑底土体加固对地连墙变形的控制效果。结果表明: 随着偏压荷载大小或偏压荷载宽度的增加, 偏压侧、非偏压侧地连墙分别向坑内、坑外偏移, 而偏压荷载位置仅影响地连墙整体扭转变形趋势; 坑底土体加固对地连墙的变形控制效果明显, 在不同偏压条件下, 随着加固深度增加, 两侧地连墙分别体现为向坑外、坑内的偏移趋势, 最大侧向位移绝对值逐渐减小进而趋于恒定; 当偏压荷载距基坑较远时或偏压荷载宽度较大时, 非偏压侧地连墙最大侧向位移绝对值则呈现先减小后增大的趋势, 说明坑底土体加固不仅能够有效减小地连墙最大侧移量, 还能显著扭转其逆时针变形趋势。

关键词: 偏压荷载; 基坑支护; 土体加固; 地下连续墙; 数值模拟

中图分类号: TU473.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2022)S1-0201-06

作者简介: 周国强(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事土木工程(工业与民用建筑方向)设计与研究工作。E-mail: 419485188@qq.com。

Effects of soil reinforcement at bottom of foundation pits on deformation characteristics of retaining walls under eccentric loads

ZHOU Guo-qiang, WU Ming-ming, WANG Jing, GU Wen-chao, XU Qi-liang, FANG Min-jie

(Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311100, China)

Abstract: Based on the typical ramp foundation pit project at West Wenyi Road in Hangzhou, the influences of eccentric pressures on the deformation of diaphragm walls of the foundation pit are investigated by using the finite element method, and the control effects of soil reinforcement at the bottom on the deformation of diaphragm walls under different eccentric pressures are analyzed. The results show that with the increase of the eccentric loads or the width of the eccentric loads, the diaphragm walls at the eccentric and non-eccentric sides shift to the inner and outer sides of the foundation pit, respectively, and the position of the eccentric loads only affects the overall torsional deformation trend of the diaphragm walls. The soil reinforcement at the bottom of the pit has an obvious effect on the deformation control of the diaphragm walls. Under different eccentric pressures, with the increase of the reinforcement depth, the diaphragm walls at both sides shows a trend of shifting to the outer and inner sides of the pit, respectively, and the absolute value of the maximum lateral displacement decreases gradually and then tends to be constant. When the eccentric loads are far from the foundation pit or the width of the eccentric loads is large, the absolute value of the maximum lateral displacement of the diaphragm walls at the non-eccentric side decreases first and then increases, indicating that the soil reinforcement can effectively reduce the maximum lateral displacement of the diaphragm walls and significantly reverse their counterclockwise deformation trend.

Key words: eccentric load; support of foundation pit; soil reinforcement; diaphragm wall; numerical simulation

0 引言

随着我国城市地下空间得到大规模开发和利用, 各种基坑工程及其伴随而来的问题不断涌现, 坑外偏压荷载作用对基坑围护结构的影响就是其中之一^[1]。受周边建筑物、边坡以及建筑材料堆放等影响, 偏压基坑两侧的围护结构受到不对称的作用力, 其围护结构变形性状与对称基坑存在明显不同, 在偏压荷载作

用下, 偏压侧土体将产生较大变形, 同时基坑围护结构上产生附加水平应力, 这严重危害基坑围护结构的安全, 影响基坑整体稳定性^[2]。为解决偏压作用下基坑围护结构变形较大的问题, 采用一些加固措施(如

基金项目: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科研项目
(KY2021-JG-03-41)

收稿日期: 2022-09-23

被动区加固、主动区加固、坑外隔离柱等)来抑制基坑土体变形并减小围护结构的侧移,进而预防基坑工程事故的发生^[3]。

近年来,学者们针对偏压基坑开展了一定研究,主要包括偏压作用下围护结构的变形及内力特征、地表沉降变形、坑底隆起变形等方面^[4-6]。研究内容大多是根据某一典型偏压基坑,分析基坑开挖施工过程中偏压荷载对围护结构或基坑周围环境的影响。偏压荷载大小、偏压荷载位置、偏压荷载宽度及偏压荷载类型对基坑周围环境及围护结构均有不同程度的影响,同时,在不同偏压条件下,基坑加固的效果也存在差异^[7-8],现有研究对这些都还关注较少。

鉴于此,本文依托杭州文一西路提升改造工程中的隧道深基坑工程,采用有限元分析方法,针对坑外堆载作用对基坑围护结构的影响问题,考虑偏压荷载大小、偏压荷载位置及偏压荷载宽度,在系统研究围护结构变形特性的基础上,分析不同偏压条件下坑底被动区土体加固对围护结构变形的控制效果,以期为类似偏压深基坑提供一定借鉴或参考。

1 工程概况

杭州市余杭区文一西路提升改造地下道路工程隧道基坑设计范围西起于东西大道,终于创远路,设计里程桩号 K0+500—K3+630,基坑整体开挖深度为 0~16.9 m,沿线基坑宽度不同,标准段基坑宽度介于 29.5~48.0 m,匝道段基坑宽度为 14 m 左右。基坑沿线两侧环境复杂,部分路段周边无建筑物、构筑物,大量开挖后的土体被堆载在该段基坑一侧,对基坑产生了明显的偏压作用。对于宽度更小的匝道基坑,偏压作用对两侧地连墙的影响更为显著,因此,本文以典型匝道基坑为对象开展研究。

如图 1 所示,典型匝道基坑采用明挖顺作法施工,其围护结构主要采用地下连续墙(厚度 800 mm),支撑体系为 4 道水平内支撑,其中第 1 道为钢筋混凝土支撑,截面尺寸 800 mm×800 mm,间距为 9 m,第 2~4 道则采用 $\Phi 609 \times 16$ 的钢管支撑,间距为 3 m。整体开挖深度介于 0~16.9 m。基坑开挖范围内穿越地层依次为①杂填土、②粉质黏土、③淤泥质粉质黏土、④粉质黏土。其中,③淤泥质粉质黏土的工程力学特性较差,采用水泥搅拌桩($\Phi 850 @ 600$)对坑底土体进行加固。

2 有限元模型建立

2.1 模型尺寸

结合该工程的典型地层和结构参数,采用 MIDAS

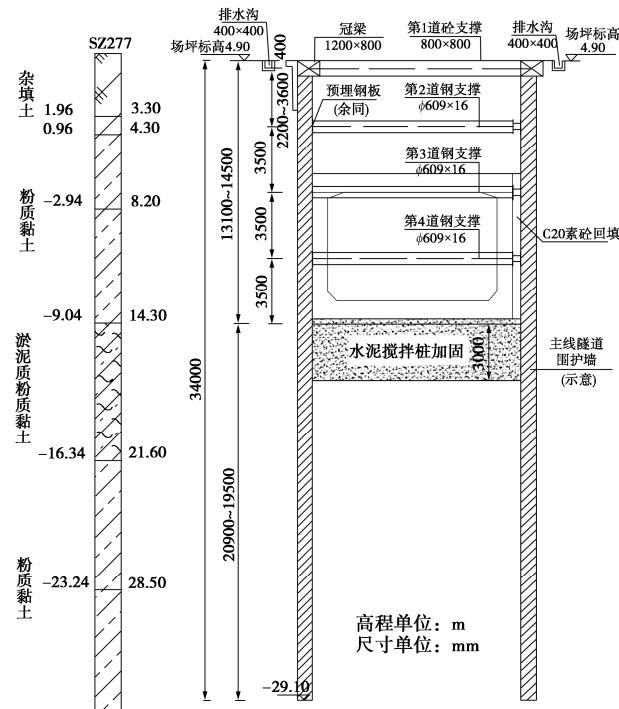


图 1 典型匝道基坑支护剖面图

Fig.1 Profile of support for typical ramp foundation pit
GTS NX 建立基坑模型,如图 2 所示。其中, B 为偏压荷载分布宽度, L 为偏压荷载距基坑顶缘的水平距离,基坑开挖深度 H 为 14.0 m。为消除有限元计算中边界效应的影响,基坑两侧边界与模型边界水平距离取基坑宽度的 5 倍,即 70 m,基坑底部边界与模型边界竖向距离取基坑深度的 3 倍,即 40 m。

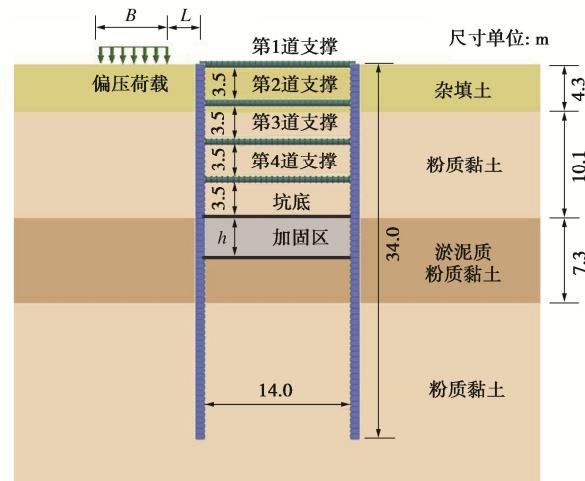


图 2 基坑数值分析模型简图

Fig. 2 Numerical model for foundation pit

2.2 计算参数

地连墙及内支撑采用 1D 梁单元进行模拟,材料考虑为线弹性本构模型。钢筋混凝土支撑,间距为 9 m,截面为 800 mm×800 mm,弹性模量为 30 GPa,重度为 23.5 kN/m³;钢管支撑,间距为 3 m,截面直径

为 609 mm, 厚度为 16 mm, 弹性模量为 200 GPa, 重度为 78.5 kN/m³。地下连续墙采用 C35 混凝土, 弹性模量为 31.5 GPa, 厚度为 800 mm。

基坑土体采用实体单元建模, 坑内土体网格尺寸取 0.5 m, 坑外土体取 1.0 m, 本构模型采用能够考虑剪切硬化和压缩硬化的 HSS 模型, 模型中参数根据地勘报告取值, 对于未提供的参数, 参考文献[9]取值, 具体土层参数见表 1。对于采用水泥土桩加固的坑底土体, 参考文献[10]采用莫尔库伦模型进行模拟, 黏聚力取 120 kPa, 内摩擦角取 22°, 弹性模量取 90 MPa。

在地连墙与土体间采用 MIDAS GTS NX 中内置的 GOODMAN 界面单元进行模拟, 通过界面助手计算得到不同土层与排桩的界面参数, 由于设置界面单元后土体单元与排桩接触处节点分离, 为顺利进行其它步骤的分析, 在设置界面单元时同时建立了刚性连接网格。

表 1 土层计算参数

Table 1 Parameters of soil layers

土层	①杂填土	②粉质黏土	③淤泥质粉质黏土	④粉质黏土
层厚/m	4.3	10.1	7.3	25.3
$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	18.5	18.7	16.3	19.3
E_{50}/MPa	4.5	5.3	2.3	6.2
E_{ode}/MPa	4.5	5.3	2.3	6.2
E_{ur}/MPa	31.4	40.8	16.5	54.6
c'/kPa	22.7	6.3	5.1	9.5
$\varphi'(^{\circ})$	18.1	28.3	15.2	32.6
m	0.8	0.8	0.9	0.8
$\gamma^{0.7}/(10^{-4})$	2.7	2.7	2.7	2.7
R_f	0.8	0.9	0.9	0.9

2.3 计算方案步骤

通过激活或钝化土体单元的来实现基坑开挖施工过程模拟, 具体分析步骤如下: ①激活所有土层单元, 同时, 为保证该分析步中土体单元节点耦合, 激活桩-土界面间的刚性连接网格, 进行初始应力分析; ②激活地连墙和界面单元, 同时钝化界面间的刚性连接网格; ③坑底土体加固; ④施加地连墙; ⑤施工第 i 层内支撑, 开挖第 i 层土体 ($i=1, 2, 3, 4$); ⑥开挖至坑底。

计算方案中, 考虑偏压荷载大小 ($q=0, 20, 40, 60, 80, 100$ kPa)、偏压荷载距坑边水平距离 ($L=0, 3, 6, 9, 12, 15$ m)、偏压荷载宽度 ($B=0, 3, 6, 9, 12, 15$ m), 在此基础上, 探究不同坑底被动区土体加固深度 ($h=0, 2, 3, 4, 5, 6$ m) 情况下地连墙的变形性状, 共计 $(6+6+6-1) \times 6=102$ 个模型。

3 偏压条件下基坑地连墙受力变形性状

3.1 不同开挖过程中地连墙变形性状

为探究偏压与非偏压侧地连墙的变形性状, 给出

了两种偏压位置情况下基坑开挖过程中地连墙水平位移与深度的关系曲线, 见图 3。

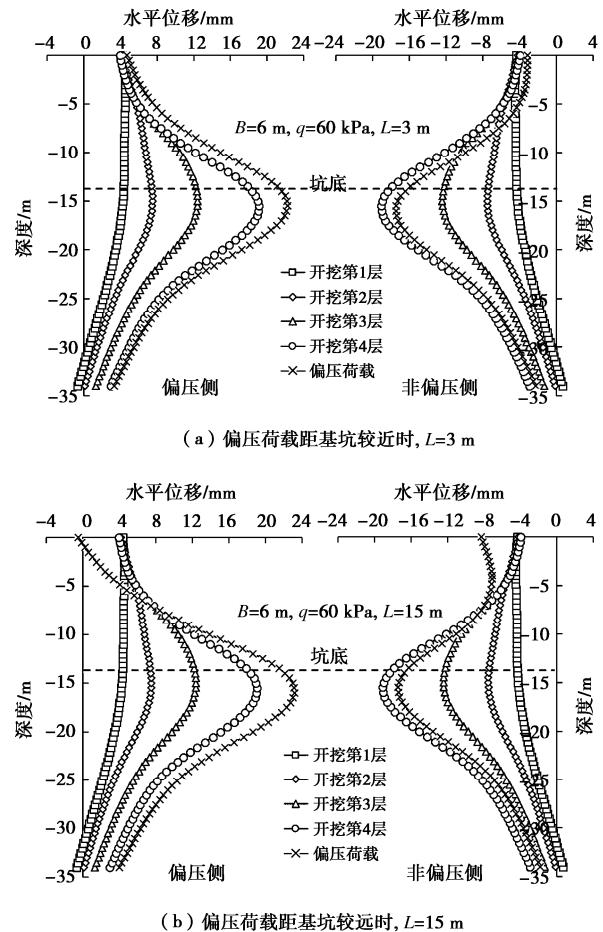


图 3 基坑开挖过程中地连墙水平位移变化规律

Fig. 3 Variation laws of horizontal displacement of diaphragm walls at different excavation stages

在开挖第 1 层时, 两侧地连墙均呈现悬臂式变形模式, 随着开挖深度的增加, 两侧地连墙逐渐转变为鼓肚式变形模式, 最大水平位移出现位置随着开挖深度增加而增加。当开挖完成后, 地连墙最大水平位移在坑底以下约 2 m 处达到峰值。

如图 3 (a) 所示, 当偏压荷载距基坑较近时 ($L=3$ m), 施加偏压荷载后, 偏压侧地连墙整体向坑内变形, 水平位移均增大, 非偏压侧地连墙整体向坑外偏移, 水平位移绝对值均减小。

然而, 从图 3 (b) 可发现, 当偏压荷载距基坑较远时 ($L=15$ m), 施加偏压荷载后, 偏压侧地连墙存在逆时针扭转变形趋势, 地连墙下部 (约 3/4 长度) 仍向坑内变形, 上部 (约 1/4 长度) 则向坑外偏移, 越靠近地表偏移量越大。类似地, 非偏压侧地连墙下部 (约 3/4 长度) 仍向坑外变形, 上部 (约 1/4 长度) 则向坑内偏移。

在偏压荷载大小、宽度一定时, 偏压荷载位置并

不影响地连墙最大水平位移，但影响了其随深度方向上的趋势，即从横向偏移趋势变为逆向扭转趋势。

3.2 不同偏压条件下地连墙水平变形分布规律

为进一步研究偏压作用对地连墙变形性状的影响，给出了不同偏压条件下地连墙水平变形随深度的变化曲线，见图 4。

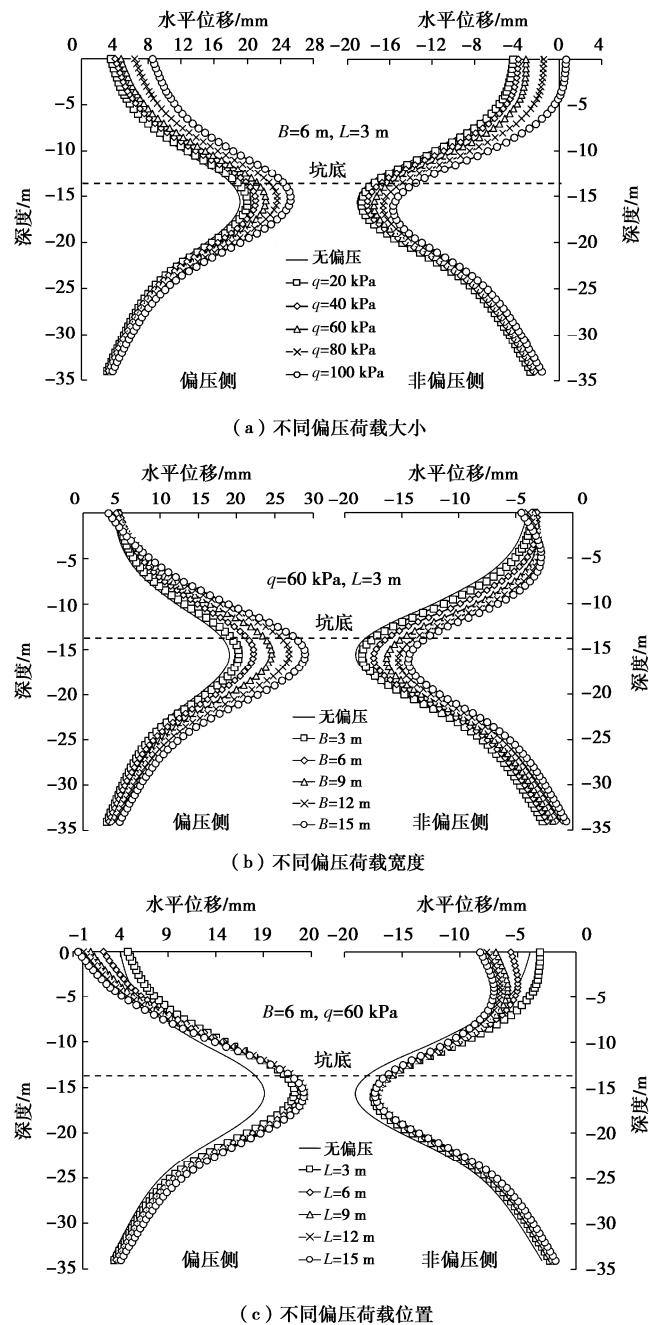


图 4 不同偏压荷载条件下地连墙水平位移分布曲线

Fig. 4 Distribution curves of horizontal displacement of diaphragm walls under different eccentric loads

从图 4 (a) 可知，在偏压荷载位置、宽度一定时，随着偏压荷载逐渐增大，偏压侧、非偏压侧地连墙分别体现为向坑内、坑外的变形趋势，两侧地连墙顶部变形变化率均大于下部，其中，非偏压侧地连墙顶部

水平变形变化率大于偏压侧。

从图 4 (b) 可知，在偏压荷载大小、位置一定时，随着偏压荷载宽度逐渐增大，偏压侧地连墙整体上呈现为向坑内变形，但偏压侧地连墙上部区域（距地表 2 m 范围）水平变形逐渐减小，呈现逆时针扭转趋势。对于非偏压侧地连墙而言，随着偏压荷载宽度增加，地连墙整体朝向坑外变形，类似地，近地表区域呈现向坑内变形趋势。

从图 4 (c) 可发现，在偏压荷载大小、宽度一定时，随着偏压荷载距基坑水平距离的增大，偏压侧地连墙最大水平位移变化并不显著，但其变形规律存在较大改变，呈明显的逆时针扭转趋势，地连墙顶部区域（约 1/4 长度）逐渐向坑外变形，下部区域则向坑内部偏移。非偏压侧地连墙也存在类似的变化规律。

进一步，给出了不同偏压条件下地连墙的最大水平位移，如图 5 所示。可见，对于本基坑工程模型而言，偏压侧、非偏压侧地连墙最大水平变形量与偏压荷载大小、偏压荷载宽度分别呈线性增大、线性减小趋势。然而，偏压荷载位置对地连墙最大水平变形量并不敏感，如前文所述，偏压荷载距基坑越远，地连墙逆向扭转的程度越大。

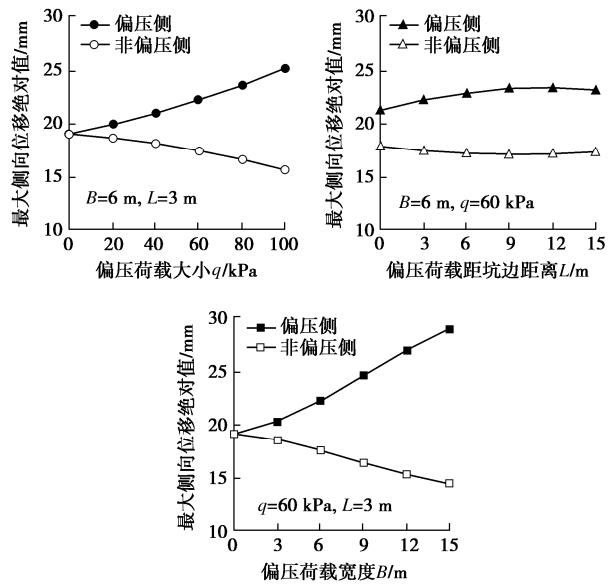


图 5 不同偏压条件下地连墙的最大侧向位移

Fig. 5 Maximum lateral displacements of diaphragm walls under different eccentric loads

4 不同偏压条件下坑底土体加固对围护结构变形特性的影响

4.1 不同加固深度条件下围护结构侧向变形分布

根据前文所述，当偏压荷载与基坑距离较近时，随着偏压荷载增加，偏压侧、非偏压侧地连墙分别朝坑内、坑外偏移。然而，当偏压荷载宽度、偏压荷载

距基坑水平距离逐渐增大, 基坑整体呈现逆时针扭转趋势。为减小围护结构的水平变形, 并限制其扭转变形, 采用水泥搅拌桩($\Phi 850@600$)对坑底土体进行加固。为探究不同偏压条件下坑底土体加固对围护结构变形的控制效果, 考虑5种加固深度进行了计算分析。

如图6所示, 与加固前相比, 坑底土体加固后的偏压侧、非偏压侧地连墙朝坑内变形均发生显著减小, 其中, 地连墙中部区域减小趋势最大, 其次是上部区域。随着加固深度的增大, 偏压侧地连墙均呈现向坑外变形趋势, 其中, 加固区附近地连墙的水平变形减小幅度较其它区域大得多。随着加固深度的增大, 非偏压侧地连墙-10 m深度以下区域朝坑外变形, 而-10 m深度以上则存在向坑内的变形趋势。

结合图4的结果可说明, 坑底土体加固不仅能够有效降低地连墙的最大水平变形, 还能够有效控制地连墙的扭转变形。

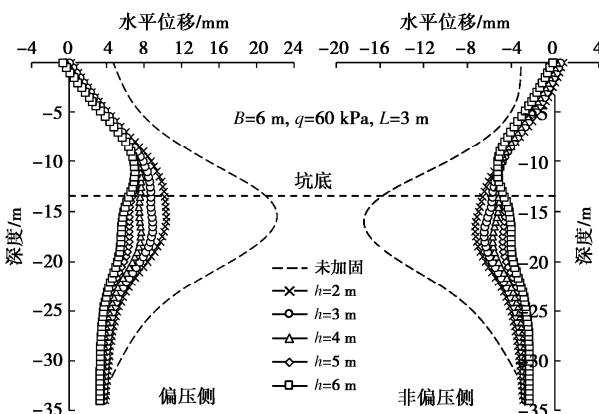


图6 偏压条件下坑底土体加固对地连墙水平位移分布的影响

Fig. 6 Effects of soil reinforcement on horizontal displacement distribution of diaphragm walls under eccentric loads

4.2 不同偏压条件下坑底土体加固效果分析

围护结构的最大水平变形是目前基坑工程中关注的重要指标, 图7给出了不同偏压条件下地连墙最大水平位移绝对值与坑底土体加固深度的关系曲线。

如图7(a)所示, 当偏压荷载位置和宽度一定时, 在不同偏压荷载大小条件下, 偏压侧地连墙最大侧向变形绝对值随加固深度增大逐渐减小进而趋于恒定, 而非偏压侧地连墙则随着加固深度增大呈先减小后略微增大的趋势。

从图7(b)可知, 当偏压荷载大小和位置一定时, 在不同偏压荷载宽度条件下, 偏压侧围护墙最大侧向变形绝对值随着加固深度增大而减小, 且减小幅度逐渐降低。然而, 在荷载宽度较大时, 非偏压侧最大侧向变形绝对值随加固深度增大呈现先减小后增大的趋势, 说明加固深度增大对非偏压侧的扭转变形产生较

大控制作用, 导致其向坑内变形增大。图7(c)也存在类似的规律。

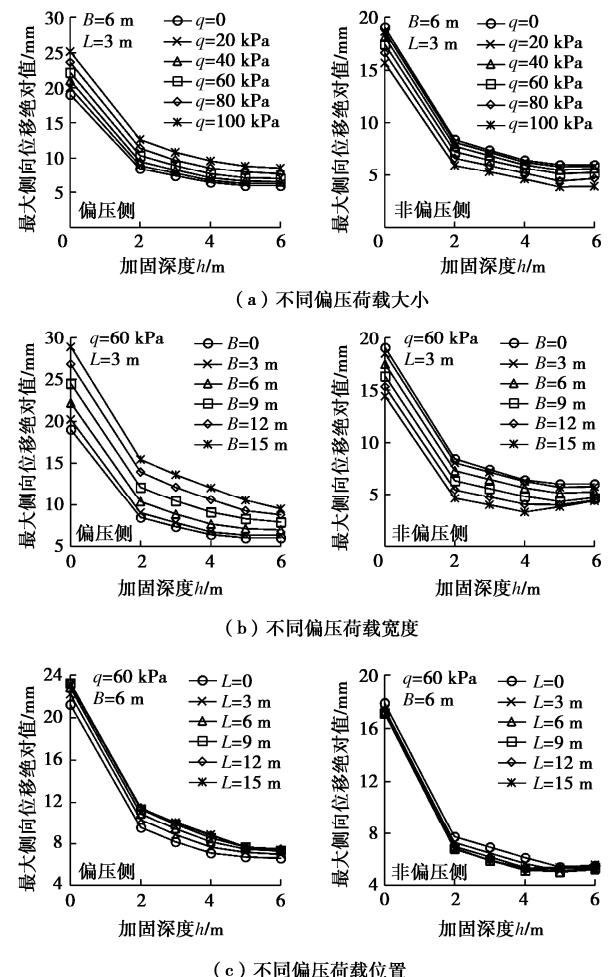


图7 不同偏压条件下地连墙最大水平位移与加固深度的关系

Fig. 7 Relationship between maximum horizontal displacement of diaphragm walls and reinforcement depth under different eccentric loads

根据《基坑工程技术规范》DGTJ08—61—2010, 一级基坑围护结构最大侧移应控制为 $0.018\%H = 25.2$ mm 以内, 对于本文基坑工程而言, 坑底土体加固深度超过 2 m 后, 偏压侧围护结构最大侧移减小率为 50%以上, 非偏压侧则为 70%以上。

5 结 论

(1) 基坑地连墙的变形性状受偏压作用影响显著, 当偏压荷载距基坑较近时, 偏压侧、非偏压侧地连墙分别呈现向坑内、坑外的变形趋势, 荷载大小主要影响其变形量大小, 对其变形分布规律影响不显著。随着偏压荷载距基坑水平距离、偏压荷载宽度增大, 基坑体现为整体逆时针扭转变形模式。

(2) 偏压荷载大小和偏压荷载宽度对地连墙最大侧移量的影响显著, 而偏压荷载位置对地连墙最大侧

移量影响较小, 但对地连墙整体扭转趋势影响较大。

(3) 采用水泥搅拌桩对坑底土体加固后, 偏压侧、非偏压侧地连墙分别体现为向坑外、坑内的偏移趋势; 其中加固区附近的地连墙水平变形减小幅度相对其它区域更为显著。

(4) 在不同偏压条件下, 随着加固深度的增加, 两侧地连墙最大侧向位移绝对值从整体上看均呈现逐渐减小进而趋于恒定的趋势, 但当偏压荷载距基坑较远时或偏压荷载宽度较大时, 非偏压侧最大侧向位移绝对值呈现先减小后增大的趋势。说明坑底土体加固深度增加不仅能够有效降低围护结构的最大侧移量, 还能显著抑制其逆时针扭转变形趋势。

参考文献:

- [1] 袁宗浩, 严昱翔, 陈娟, 等. 考虑偏压作用的基坑抗隆起稳定性上限分析[J]. 水利水电技术, 2020, **51**(3): 1–9. (YUAN Zong-hao, YAN Yu-xiang, CHEN Juan, et al. Upper bound method for basal heave stability analysis of braced excavations considering surcharge loading effect[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, **51**(3): 1–9. (in Chinese))
- [2] 朱湘旭, 徐昭辰, 章定文, 等. 硬质地层中偏压基坑支护结构受力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊2): 166–169. (ZHU Xiang-xu, XU Zhao-chen, ZHANG Ding-wen, et al. Behaviors of supporting structures of asymmetrically loaded deep excavation in hard soil layer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **42**(S2): 833–845. (in Chinese))
- [3] 石钰锋, 阳军生, 白伟, 等. 紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(4): 826–833. (SHI Yu-feng, YANG Jun-sheng, BAI Wei, et al. Analysis of field testing for deformation and internal force of unsymmetrical loaded foundation pit's enclosure structure close to railway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(4): 826–833. (in Chinese))
- [4] 刘波, 章定文, 席培胜. 偏压基坑工程设计、施工与受力变形特性研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2018, **47**(4): 791–804. (LIU Bo, ZHANG Ding-wen, XI Pei-sheng. Review on design, construction, stress and deformation characteristics of asymmetrically loaded deep excavation[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, **47**(4): 791–804. (in Chinese))
- [5] 孙武斌. 地铁车站偏压基坑围护结构变形影响因素研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, **39**(4): 86–91. (SUN Wu-bin. Influence factors of deformation of enclosure structure of biasing foundation[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2020, **39**(4): 86–91. (in Chinese))
- [6] 王鹏. 考虑不同偏压作用的地铁深基坑受力与变形规律研究[J]. 现代隧道技术, 2019, **56**(增刊2): 424–431. (WANG Peng. Analysis of the different bias action affecting the support structure forces and deformations of excavation pit[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, **56**(S2): 424–431. (in Chinese))
- [7] XU C J, XU Y L, SUN H L, et al. Characteristics of braced excavation under asymmetrical loads[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 1–12.
- [8] LIU B, ZHANG D W, XI P S. Influence of vehicle load mode on the response of an asymmetrically-loaded deep excavation[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, **23**(8): 3315–3329.
- [9] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, **42**(3): 833–845. (GU Xiao-qiang, WU Rui-tuo, LIANG Fa-yun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(3): 833–845. (in Chinese))
- [10] 秦会来, 黄俊, 李奇志, 等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(增刊2): 23–26. (QIN Hui-lai, HUANG Jun, LI Qi-zhi. Influencing factors for deformation of deep foundation pits in thick mud stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(S2): 23–26. (in Chinese))

(编校: 明经平)