

深基坑开挖段被动区加固的位移控制效果分析

李志伟^{1, 2}, 侯伟生^{1, 2}, 叶爱丽^{1, 2}, 陈可帅^{1, 2}, 唐 勇^{1, 2}

(1. 福建省建筑科学研究院, 福建 福州 350025; 2. 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福建 福州 350025)

摘要: 在深基坑施工过程中, 为有效控制基坑的变形, 常在坑底进行被动区加固, 但对于开挖段的被动区加固研究则很少。针对开挖段被动区加固效果进行深入分析, 结果表明: 基坑开挖段被动区加固存在最优加固高度, 当加固高度小于该高度时, 随着被动区加固宽度与高度的增大, 围护结构的水平位移与坑外地表沉降均有明显的减小, 但当加固高度达到并大于该高度时, 围护结构水平位移最大值及坑外地表沉降最大值则基本趋于稳定, 但可减小围护结构的顶部位移, 这对于基坑周边环境的保护具有重要的意义。

关键词: 深基坑; 开挖段; 被动区加固; 位移控制

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0621-07

作者简介: 李志伟(1984-), 男, 福建永春人, 博士, 主要从事深基坑工程的设计与研究工作。E-mail: lzhw2011@yahoo.cn。

Displacement control effect of passive zone improvement at excavation section of deep foundation pits

LI Zhi-wei^{1, 2}, HOU Wei-sheng^{1, 2}, YE Ai-li^{1, 2}, CHEN Ke-shuai^{1, 2}, TANG Yong^{1, 2}

(1. Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350025, China; 2. Fujian Key Laboratory of Green Building Technology, Fuzhou 350025, China)

Abstract: In the construction process of deep foundation pits, the passive zone improvement at the pit bottom is often used to control the deformation. But the study on the passive zone improvement at the excavation section of deep foundation pits is very rare. The displacement control effect of the passive zone improvement at excavation section is studied. The results show that the optimal improvement height for the passive zone improvement exists. When the improvement height is lower than the optimal height, the horizontal displacement of the retaining wall and the settlement of the ground surface settlement reduce with the increase of the improvement height. When the improvement height is higher than the optimal height, the maximum of the above-mentioned two remains almost unchanged. But the increase of the improvement height can reduce the horizontal displacement of the top of the retaining wall, which has great significance for the protection of the surrounding environment.

Key words: deep foundation pit; excavation section; passive zone improvement; displacement control

0 引言

随着我国工程建设的快速发展和城市地下空间的大规模开发及利用, 深基坑及超深基坑已经成为了基坑工程中理论研究与工程实践的主题, 其中城市深基坑工程的环境保护问题成为了深基坑技术发展所必需面临的一个重要课题, 深基坑工程的发展逐渐进入了变形控制时代。如何有效地控制深基坑围护结构施工、降水及土方开挖等各个环节中所产生的变形, 并将变形控制在允许范围内, 成为了深基坑工程设计与施工的重中之重。

在软土地区, 为了有效地控制深基坑的变形, 常对被动区土体进行加固。在对被动区土体进行加固后, 可以较大程度提高被动区土体的土压力系数, 从而使

被动区抵抗围护结构变形的能力显著提高, 并最终达到控制基坑变形的目的。

关于坑底被动区加固, 诸多学者^[1-9]进行了较为深入的研究。其中, 郑俊杰等^[1]结合具体地铁深基坑工程实例, 对裙边加固和抽条加固的主要参数及布置形式进行深入的探讨, 并得到了被动区加固的最优加固宽度与深度。侯新宇等^[2]结合苏州地铁某车站深基坑开挖进行有限元数值模拟, 对不同压缩模量的被动区加固体对基坑变形的影响进行深入的分析。罗战友等^[3-4]以弹性地基梁法为基础, 建立了基坑的有限元模型, 分析了坑内土体的加固深度及程度对围护结构变形及

内力的影响。秦爱芳等^[5]以卸荷试验为基础, 提出了上海软土地区基坑工程中被动区土体的合理加固深度, 并通过计算及工程实践加以验证。怀文卫等^[6]分析了逆作法基坑中不同加固范围对地下连续墙水平位移的影响。杜金龙等^[7]通过有限元弹塑性分析, 讨论了不同加固范围、加固程度及加固位置等对桩基侧向变形的影响。寿旋等^[8]基于弹性地基梁法对被动区土体加固高度进行较为深入分析, 认为靠近坑底的单位加固高度对围护结构位移的控制作用比靠近地表的单位竖向加固高度大, 且在第三道支撑以上的加固土体对围护结构最大变形和最大弯矩影响都很小。此外, 诸多学者^[9-12]通过具体工程实例, 分析了被动区加固对支护结构侧向变形和周围环境的影响。

然而, 上述学者均主要针对基坑最终开挖面以下的被动区加固进行研究, 而针对开挖段的被动区加固研究则很少。但在软土地区中, 为了有效地控制深基坑的变形, 保护周边环境的安全, 则有必要对开挖段的被动区土体进行加固。因此, 本文将结合具体深基坑工程实例, 对深基坑开挖段被动区加固进行深入的分析, 从而了解基坑开挖段被动区土体加固对基坑变形的控制效果。

1 工程概况

拟建工程为 1 幢 39 层商务大厦, 采用框架-双核心筒体结构体系, 基础拟采用冲孔灌注桩基础, 并设有 4 层满铺地下室。该工程场地位于城市繁华地段, 东侧为 18~21 层住宅小区, 采用桩基础, 设一层地下室, 距离基坑外边线约 15.5 m; 南侧为 5 层砖混结构, 距基坑外边线约 12 m; 西侧距离城市主干道约 10 m, 且地下埋设有电话及通讯线, 北侧为 19 层高层商务办公楼, 采用钢筋混凝土预制方桩, 设 1 层地下室, 距基坑外边线约 5.8 m。

拟建工程深基坑呈长方形, 长 70.7 m, 宽 68.3 m, 开挖深度达 18.7 m, 基坑周长约 280 m。围护结构采用 $\Phi 1300@1500$ 冲孔灌注桩, 长度约 38 m, 设 3 道钢筋混凝土十字对撑(见图 1), 并采用 $\Phi 850@600$ 的三轴水泥搅拌桩作为止水帷幕。

为了有效地保护基坑周边的建筑物、管线及道路的安全, 本工程需严格控制基坑的变形。根据地区深基坑变形控制要求, 一级基坑支护围护桩顶部(深层)水平位移设计计算限值取 20(40) mm 和 0.2%(0.3%) 的基坑深度的较小值。在本工程中, 基坑开挖深度为 18.7 m, 故本工程围护结构的桩顶及深部水平位移限值分别为 20 mm 和 40 mm。

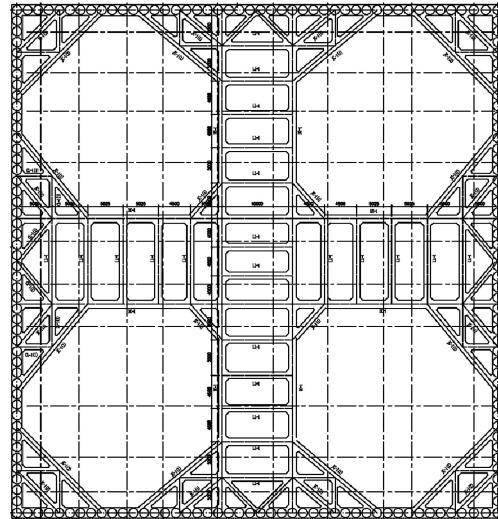


图 1 基坑平面布置图

Fig. 1 Plan of excavation

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层编号	物理力学指标				
	天然 重度 γ $/(kN\cdot m^{-3})$	厚 度 d/m	黏聚 力 c/kPa	内摩 擦角 $\phi/(^\circ)$	压缩模 量 E_{s1-2} $/(kN\cdot m^{-2})$
①杂填土	18.5	3.0	10.0	15.0	5000
②淤泥	15.8	16.7	8.0	8.0	3000
③粉质黏土	19.1	1.7	26.5	13.0	6700
④砾砂	19.4	1.0	0	26.0	13000
⑤淤泥质土	17.3	7.8	15.0	10.0	3900
⑥卵石	21.0	2.2	0	33.0	25000
⑦淤泥质土	17.0	2.8	15.0	11.0	4000
⑧粉质黏土	18.9	1.2	24.0	14.0	5900
⑨粗砂	18.8	1.0	0	28.0	16000
⑩卵石	21.5	5.8	0	35.0	35000
⑪花岗岩	22.0	—	100.0	45.0	40000

由表 1 中的土层分布情况可知, 影响本工程基坑变形的主要软弱土层包括②淤泥及⑤淤泥质土, 其中, ②淤泥层贯穿开挖段, 而⑤淤泥质土则位于开挖面以下一定深度。因此, 为了更为有效地控制基坑的变形, 分别对坑底及开挖段的被动区土体进行加固, 坑底被动区加固至⑥卵石顶面, 而开挖段被动区加固则是本文分析的重点。

2 计算模型

为了了解开挖段被动区加固对基坑变形的影响, 本文采用平面有限元对基坑变形进行分析, 具体模型如下。

2.1 土层参数

土体本构模型采用硬化土模型, 其基本思想是基于三轴排水试验中偏应力与轴向应变之间的双曲线关系建立起来的, 主要参数有主偏量加载刚度模量 E_{50} 、

卸载/再加载刚度模量 E_{ur} 及侧限压缩刚度 E_{oed} 。依据软土地区工程经验及大量试验结果^[13-14], 本文取 $E_{50}=E_{oed}=E_{s1-2}$, $E_{ur}=5E_{50}$, 土体采用 15 节点三角形单元进行模拟。

2.2 基坑参数

土层厚度取 80 m, 宽度取 130 m, 开挖侧宽度取 40 m, 坑外侧宽度取 90 m, 大于 4 倍开挖深度, 可满足基坑变形要求^[13], 具体模型尺寸如图 2 所示。

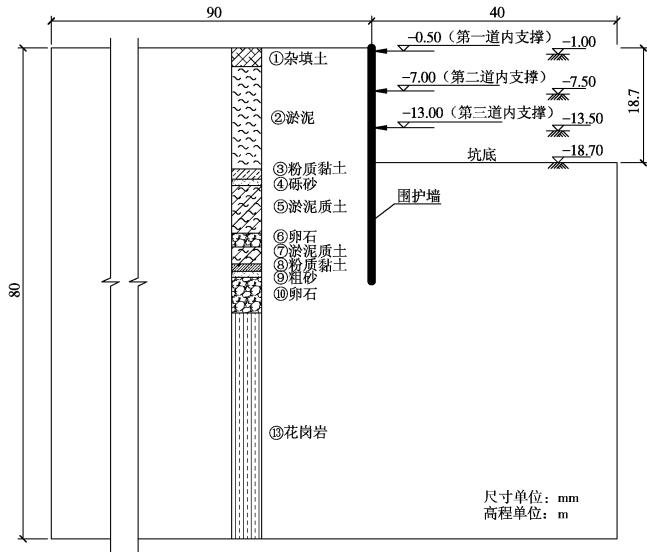


图 2 模型尺寸示意图

Fig. 2 Dimensions of model

2.3 工况模拟

施工工况模拟包括: ①平衡地应力, 并对位移清零; ②激活围护结构模型, 并将位移清零; ③被动区加固; ④进行坑内土体开挖及支撑架设, 开挖面分别为 -1.0, -7.5, -13.5, -18.7 m; 支撑位置分别为 -0.5, -7.0, -13.0 m, 且第一道支撑刚度取 9×10^4 kN/m, 第二道及第三道支撑刚度均取 1.6×10^5 kN/m。

3 无被动区加固时基坑变形

为了了解被动区加固对基坑变形的影响, 本文首先对无被动区加固时的基坑变形进行分析。当无被动区加固时, 围护结构水平位移及坑外地表沉降曲线如图 3 及图 4 所示。

由图 3 及图 4 可知, 当无被动区加固时, 围护结构的最大水平位移为 58.9 mm, 墙顶水平位移为 22.2 mm, 均大于上述规定限值。由此可知, 当未对被动区进行加固时, 围护结构的变形将无法满足变形要求。

此外, 坑外地表沉降最大值为 44.2 mm, 发生在坑外距围护墙约 13 m 位置处, 显然该沉降值将对坑外建筑物及管线产生较为显著的影响, 故有必要对基坑被动区进行加固, 从而控制基坑的变形。

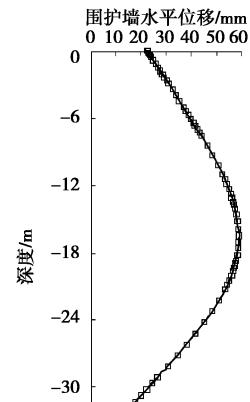


图 3 围护墙水平位移曲线

Fig. 3 Horizontal displacement of retaining wall

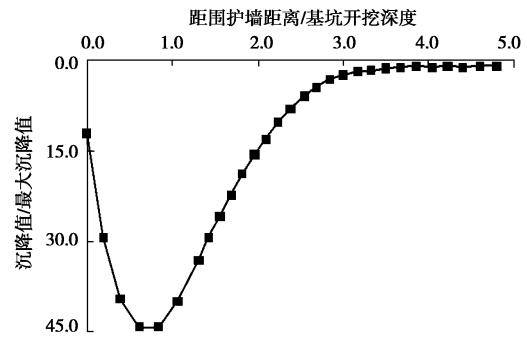


图 4 坑外地表沉降曲线

Fig. 4 Settlement of ground surface

4 坑底被动区加固效果

在对基坑坑底土体进行被动区加固分析时, 加固深度至⑥卵石顶面, 加固高度为 11.5 m, 加固宽度分别取 2, 4, 6, 8, 10 及 12 m, 具体结果如图 5 及图 6 所示。

由图 6 可知, 当加固宽度增大时, 围护结构水平位移及坑外地表最大沉降值均明显减小, 且随着加固宽度的增大, 上述二者的增幅均逐渐减小, 这表明当加固宽度达到一定值时, 即可达到较好的加固效果。在本工程中, 当加固宽度至 10 m 时, 被动区加固效果即可达到很好加固效果, 当加固宽度继续增大时, 对加固效果的影响则很小。当被动区加固宽度为 10 m 和 12 m 时, 围护结构的最大水平位移分别为 40.7 mm 和 38.8 mm, 即当加固宽度大于 10 m 时, 即可满足围护结构的位移限值要求。

同时, 通过图 5 中桩顶水平位移的变化情况可知, 尽管坑底加固对控制围护结构深部水平位移具有显著的效果, 但桩顶水平位移则基本保持不变, 仍保持在 22 mm 左右, 这表明坑底加固对围护结构顶部位移基本无影响。因此, 通过上述的分析可知, 当仅对坑底进行被动区加固时, 围护结构顶部位移仍无法满足变

形控制要求,故有必要对开挖段土体进行加固,从而更有效地控制围护结构的水平位移。

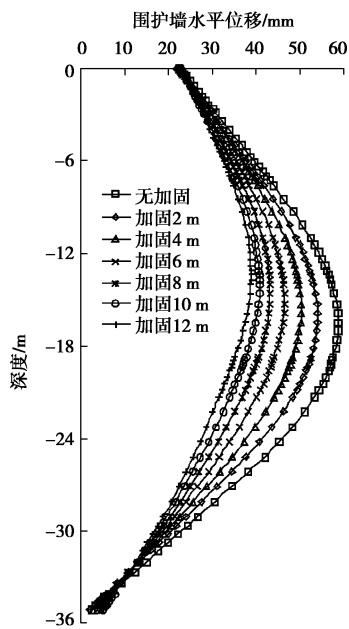


图5 围护墙水平位移曲线

Fig. 5 Horizontal displacement of retaining wall

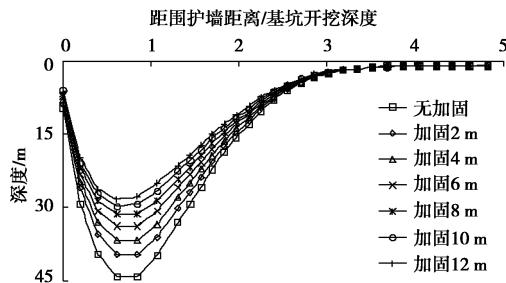


图6 坑外地表沉降曲线

Fig. 6 Settlement of ground surface

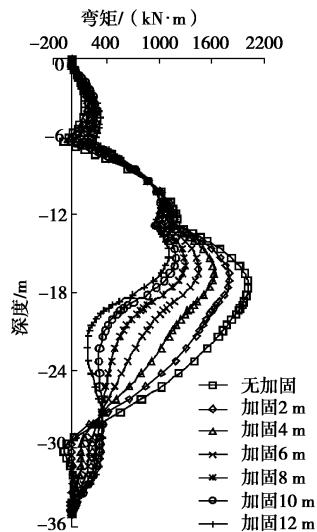


图7 围护墙弯矩变化曲线

Fig. 7 Bending moment of retaining wall

此外,为了了解被动区加固对围护结构内力产生的影响,图7给出了不同加固宽度情况下围护结构的

弯矩分布曲线。

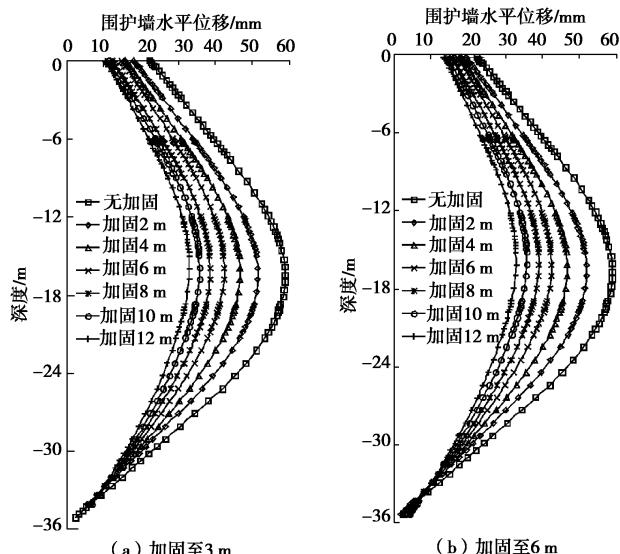
由图7可知,当坑底加固宽度逐渐增大时,围护结构的最大弯矩值亦发生明显减小,且当加固宽度大于10m时,桩身弯矩值逐渐趋于稳定,这表明当加固宽度达到一定值时,即可对围护结构的弯矩起到显著的控制作用。当加固宽度达到10m时,最大弯矩值降幅达41%,这表明坑底加固不仅对控制围护结构的水平位移有显著的作用,还对控制围护结构的内力亦具有明显的效果,并能在一定程度上降低围护结构的造价。

当然,由图7亦可以明显看出,尽管坑底加固对控制围护结构弯矩有显著作用,但仅对第三道撑以下的围护结构弯矩起抑制作用,而对第三道撑以上部分的桩身弯矩则影响很小。

5 开挖段被动区加固效果

在了解了坑底被动区加固的效果后,本节将进一步对开挖段被动区加固进行重点分析,具体加固范围分别为:加固深度底面均至⑥卵石顶面,顶面分别取地表下3(淤泥顶面),6,9,12及15m,即加固高度分别为27.2,24.2,21.2,18.2及15.2m,加固宽度分别为2,4,6,8,10及12m,具体分析结果如图8和图9所示。

由图8和图9可知,与仅进行坑底加固的计算结果相似,当被动区加固的高度不变时,围护结构的水平位移及坑外地表沉降均随加固宽度的增大而显著降低,但降幅则随着加固宽度的增大而逐渐减小,这表明随着加固宽度的继续增大,加固的效果逐渐减弱,即与坑底加固变化规律相似,当加固宽度达到一定值时,其对围护结构水平位移及坑外地表沉降的控制即可达到显著的效果,而继续增大加固宽度,则对基坑位移的控制意义不大。



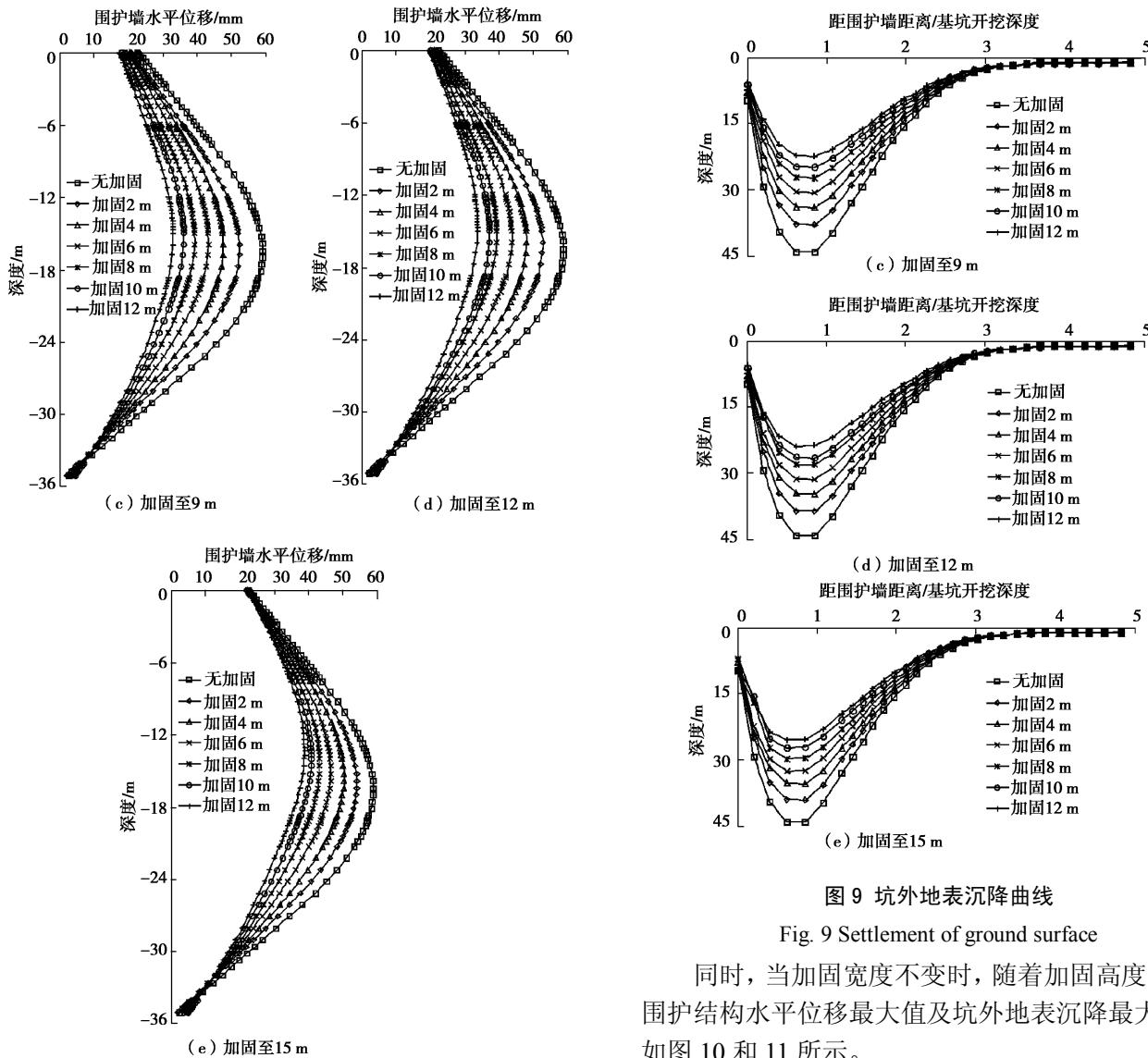


图 8 围护墙水平位移曲线

Fig. 8 Horizontal displacement of retaining wall

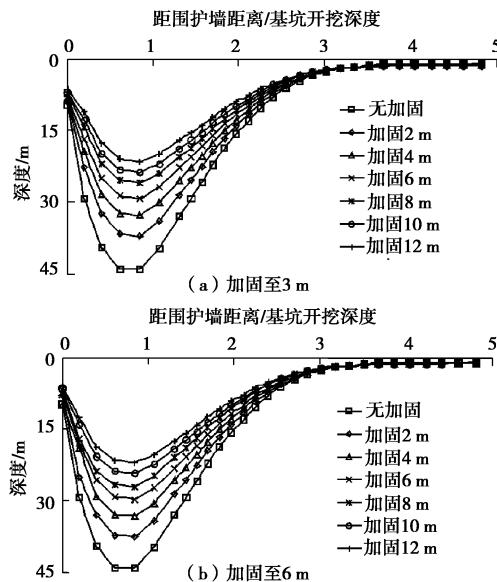


图 9 坑外地表沉降曲线

Fig. 9 Settlement of ground surface

同时, 当加固宽度不变时, 随着加固高度的增大, 围护结构水平位移最大值及坑外地表沉降最大值变化如图 10 和 11 所示。

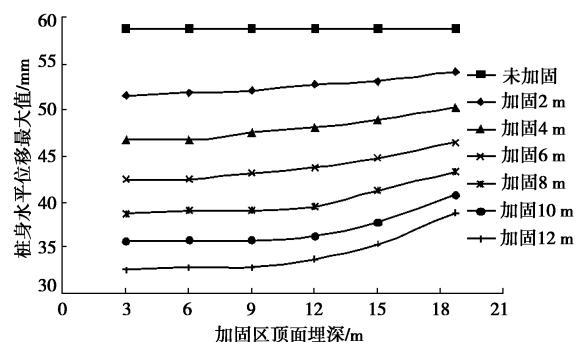


图 10 围护墙水平位移最大值随加固高度变化曲线

Fig. 10 Relationship between maximum horizontal displacement of retaining wall and improvement height

由图 10 和图 11 可知, 当加固宽度保持不变时, 随着加固高度的增大, 围护结构的水平位移最大值及坑外地表沉降最大值均产生明显的下降, 尤其是当加固宽度大于 8 m 时, 上述二者的降幅更加显著, 但当加固顶面埋深达到 9 m 后, 上述二者则逐渐趋于稳定,

这表明开挖段被动区加固存在最优加固高度, 当达到最优加固高度后, 即便继续加高加固区范围, 对于控制围护结构水平位移及坑外地表沉降最大值的意义并不大。

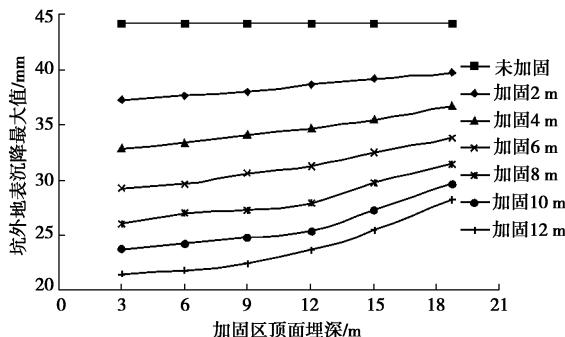


图 11 坑外地表沉降最大值随加固高度变化曲线

Fig. 11 Relationship between maximum settlement of ground surface and improvement height

同时, 由图 8 中不同加固高度的围护墙顶部水平位移最大值的对比 (见图 12) 可知, 与前文中仅进行坑底加固的工况不同, 随着加固高度的增大, 被动区加固不仅约束了围护结构的深层水平位移, 还对围护结构顶部的位移起了显著的控制作用。

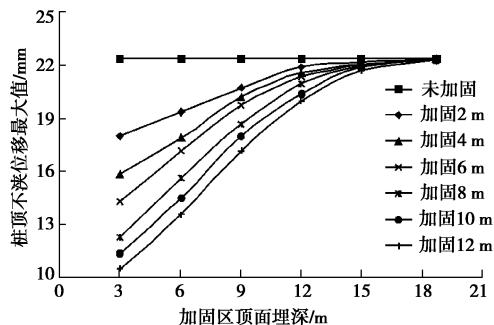


图 12 围护墙顶部水平位移随加固高度变化曲线

Fig. 12 Relationship between maximum horizontal displacement of top of retaining wall and improvement height

此外, 对比图 10 与图 12 可知, 当加固高度达到最优加固高度后, 继续增大加固深度对控制围护结构最大水平位移已无显著作用, 但对于控制围护结构的顶部位移却有着积极的作用。根据侯学渊的地层损失法的概念^[14]可知, 坑外地表沉降与围护结构的水平位移紧密相关。因此, 开挖段被动区加固高度越高对于保护周边环境的安全越有利, 此时具体的加固高度需结合基坑周边环境要求及工程造价进行综合考虑。

此外, 通过对不同加固高度情况下围护结构的内力分析可知, 被动区加固对控制围护结构的内力亦具有明显的效果, 但仅对深部围护结构弯矩产生较为显著的影响, 且随加固高度的增大, 影响范围逐渐向上扩展, 而对浅部围护结构弯矩则影响很小。

6 结语

通过对基坑开挖段的被动区加固效果的深入分析可知, 基坑开挖段被动区加固存在最优加固高度, 当加固高度小于该高度时, 随着被动区加固宽度与高度的增大, 围护结构的水平位移与坑外地表沉降均有明显的减小, 但当加固高度达到该高度后, 继续增大加固区高度则对控制围护结构水平位移及坑外地表沉降最大值的意义不大, 但对于控制围护结构的顶部位移却有着积极的作用, 这对于基坑周边环境的保护有重要的意义。

此外, 被动区加固对控制围护结构的内力亦具有明显的效果, 但仅对深部围护结构弯矩产生较为显著的影响, 且影响范围随加固高度增大而增大, 而对浅部围护结构弯矩的影响则很小。

参考文献:

- [1] 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 of analysis of passive zone improvement of foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 1 042 - 1 051. (in Chinese))
- [2] 侯新宇, 刘松玉, 童立元, 等. 被动区深搅桩加固对地铁深基坑变形的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 180 - 184. (HOU Xin-yu, LIU Song-yu, TONG Li-yuan, et al. Effect of deep mixing pile reinforce on deformation of deep foundation pit in metro station in passive zone[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2010, 40(1): 180 - 184. (in Chinese))
- [3] 罗战友, 刘薇, 夏建中. 基坑内土体加固对围护结构变形的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊 1): 1538 - 1540. (LUO Zhan-you, LIU Wei, XIA Jian-zhong. Effect of improvement soils on lateral deformation of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S1): 1538 - 1540. (in Chinese))
- [4] 罗战友, 夏建中, 刘薇. 基坑内土体加固对悬臂式支护结构的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊 2): 931 - 934. (LUO Zhan-you, XIA Jian-zhong, LIU Wei. Analysis of influence of soil improvement on lateral deformation and inner force of cantilever retaining structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S2): 931 - 934. (in Chinese))
- [5] 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))]
- [6] 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. (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. (in Chinese))]
- [7] 杜金龙, 杨敏. 邻近基坑桩基侧向变形加固控制分析[J]. 结构工程师, 2008, 24(5): 93 - 99. (DU Jin-long, YANG Min. Deflection control analysis of pile adjacent to deep excavation[J]. Structure Engineers, 2008, 24(5): 93 - 99. (in Chinese))]
- [8] 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(增刊1): 104 - 108. (SHOU Xuan, XU Xiao-hua, SUN Miao-miao, et al. Reinforcement height of passive zone of deep foundation pits in soft clay regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 104 - 108. (in Chinese))]
- [9] 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. (in Chinese))]
- [10] 王玉梅, 罗俊国, 苏畅, 等. 三轴深层搅拌桩加固深基坑被动区土体的应用研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(1): 16 - 18. (WANG Yu-mei, LUO Jun-guo, SU Chang, et al. Study on application of tri-axial deep stirring piles in reinforcing soil in the passive area of foundation pits[J]. Build Science, 2009, 25(1): 16 - 18. (in Chinese))]
- [11] 李冰河, 刘兴旺. 针对某一软土深基坑工程的变形发展及控制技术[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 297 - 299. (LI Bing-he, LIU Xing-wang. Deformation progress and control method of a deep foundation pit in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 297 - 299. (in Chinese))]
- [12] 应宏伟, 陈军. 浙江汇丰商务大厦基坑工程实例分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(增刊): 1815 - 1818. (YING Hong-wei, CHEN Jun. Analysis of deep excavation of Zhejiang Huifeng Building[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S0): 1815 - 1818. (in Chinese))]
- [13] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))]
- [14] KEMPFERT Hans-Georg, GEBRESELASSIE Berhane. Excavations and foundations in soft soils[M]. Berlin: Springer Verlag, 2006.

(本文责编 黄贤沙)