

文章编号: 1007-2993(2023)02-0247-06

# 基坑支护中被动区土体加固机理及优化设计研究

杨培涛<sup>1</sup> 单亭栋<sup>2</sup>

(1. 中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北武汉 430000;

2. 陕西工程勘察研究院有限公司, 陕西西安 710000)

**【摘要】** 深厚软土区的基坑工程, 常因被动区侧向抗力不足而导致竖向支护结构变形和位移过大甚至发生踢脚失稳, 通常需要对被动区土体进行加固以改善坑底软弱土层的嵌固条件, 从而加强对支护桩、墙的变形位移的控制。结合大量实际工程, 对悬臂支护基坑坑底最优加固深度和宽度提出一种拟合方法计算, 以不同深度和宽度的加固效果进行数值模拟对比分析, 并结合工程实例, 进一步研究被动区土体加固机理和加固设计优化思路, 为类似工程提供参考。

**【关键词】** 深厚软土; 基坑支护; 被动区土体; 加固设计

**【中图分类号】** TU 447

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.02.019

## Reinforcement Mechanism and Optimization Design of Soil Reinforcement in Passive Area of Foundation Pit Supporting

Yang Peitao<sup>1</sup> Shan Tingdong<sup>2</sup>

(1. Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China;

2. Shaanxi Institute of Engineering Prospecting Co., Ltd. (SIEP), Xi'an 710000, Shaanxi, China)

**【Abstract】** Due to the insufficient of lateral resistance in the passive area, the deformation and displacement of the supporting pile and wall increase with the deepening of the foundation pit excavation, so it is necessary to strengthen the control of the deformation and displacement of the supporting pile and wall by strengthening the soil in the passive area to improve the embedding condition of the soft soil at the bottom of the pit. Combined with practical engineering of supporting pile, a fitting method of the optimal reinforcement depth and width of cantilever support foundation pit bottom was provided. Numerical simulation of the strengthening effect of different depth and width were analyzed, and the passive area soil consolidation mechanism and optimization were further studied, which provides practical reference in similar project.

**【Key words】** deep soft soil; foundation pit support; passive area soil; reinforcement design

### 0 引言

城市建设用地日趋紧张, 导致高密度建筑群的大量涌现, 深基坑工程也日渐增多; 狭小复杂的施工条件, 对基坑支护的变形控制越来越严格<sup>[1]</sup>。特别是沿海沿河深厚软土地区, 若对基坑支护的变形控制不当<sup>[2]</sup>, 不仅将对周边环境造成严重影响, 还会诱发基坑坍塌事故。

加固被动区土体来控制变形已经成为深厚软土区深基坑支护设计的常用方法, 坑内土体加固能大幅度改善土体物理力学性质, 从而提高基坑抗变形能力, 有效控制围护结构的变形位移, 同时也节约成本, 降低造价。秦爱芳等<sup>[3]</sup>根据卸荷影响深度、强回弹深

度、侧压力等参数提出了被动区合理加固深度; 马郎等<sup>[4]</sup>就土质软弱地区基坑被动区加固参数对支护结构位移的影响参数进行分析, 讨论了加固区域的深度、宽度、形状等参数对支护结构位移的影响。

调研被动区土体加固的研究成果可知, 加固深度及宽度的确定没有明确可行的计算方法。本文结合深厚软土区大量深基坑工程实例, 拟合一种最优加固深度及宽度的计算方法, 通过理论分析、数值模拟与实际监测数据, 定量研究坑内加固对控制支护结构位移的作用, 优化被动区土体加固的设计。

### 1 被动区土体加固的机理

基坑开挖前, 应根据基坑稳定性和变形控制要

**作者简介:** 杨培涛, 男, 1990 年生, 汉族, 陕西西安人, 硕士研究生, 高级工程师, 从事基坑支护设计、岩土工程勘察、市政工程勘察等方面工作, 研究方向为边坡与基坑工程。E-mail: yTao5659@163.com

求开展支护设计,并进行基坑开挖对地基稳定性的影响或基坑边坡变形对周边环境影响的计算分析<sup>[5-6]</sup>。若基坑设计计算显示基坑变形量大于周边环境的允许变形量时,或基坑和周边环境存在安全风险时,则必须考虑在计算分析所显示的基坑地基薄弱部分进行可靠而合理的地基加固,使基坑变形符合要求<sup>[7-8]</sup>。当基坑竖向支护结构嵌固段(被动区)土体抗力不足时,支护结构会产生过大变形,甚至发生踢脚破坏。为避免此类危险状况,需对支护桩、墙前地基土的压力进行限制或对土体进行加固以满足水平承载能力及地基稳定要求。坑底被动区加固应有足够的宽度和深度以有效提高坑底地基土的强度和增强被动土压力的作用<sup>[9-12]</sup>。

坑底被动区土体加固,能有效地改善土体的力学指标,减小降水、土体开挖等引起的三维固结变形<sup>[13-15]</sup>,增强坑底抗隆起能力,提高被动土压力系数。总体而言,被动区加固减小支护结构的内力、水平位移、地面沉降及基坑抗隆起作用,能够提高被动区土体的侧向抗力,减小支护结构的变形。

## 2 被动区土体最优加固深度和宽度的拟合分析

### 2.1 被动区土体最优加固深度的拟合分析

在深厚软土区,如基坑支护结构体系采用悬臂支护桩,结构模型可简化为悬臂梁结构,属静定结构,存在土压力强度平衡点 O(见图 1),即临界点 O,此处(O点)的基坑外侧主动土压力强度和基坑内侧被动土压力强度相等。通过对悬臂支护桩结构和被动区土体的变形和受力分析研究发现,OB段的主动土压力强度大于被动土压力强度,被动区土体的变形最大,将先发生剪切破坏,出现坑底隆起现象。因此,在基坑支护设计中,OB段土体被认为是有效最优的坑底被动区加固竖向区域土体,即  $h_0$  为被动区土体加固的最优加固深度。

土压力强度标准值采用朗肯理论公式计算,主动、被动土压力和水压力合算时(深厚软土区土层为极微—微透水的黏性土,土孔隙中的水主要是结合水,不是自由的重力水,因此可不单独考虑静水压力)可采用式(1)、式(2)计算。

$$e_{az} = (p_{az} + q_z) \cdot k_a - 2c_k \sqrt{k_a} \quad (1)$$

$$e_{pz} = p_{pz} \cdot k_p + 2c_k \sqrt{k_p} \quad (2)$$

$$p_{az} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \quad p_{pz} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i \quad (3)$$

$$q_z = \gamma_m \cdot H \quad (4)$$

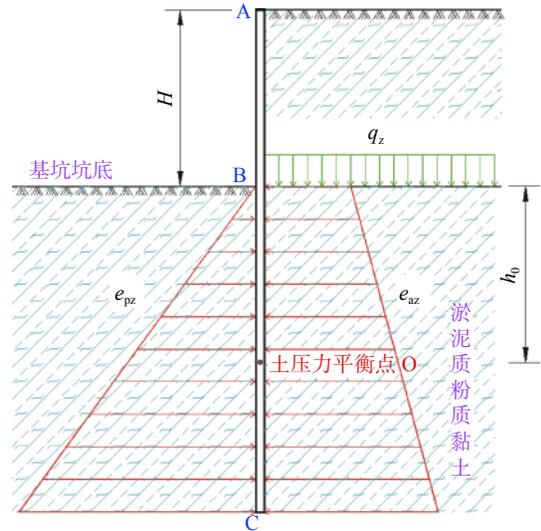


图 1 基坑土压力分布图

根据分析研究,悬臂支护桩土压力强度平衡点 O 处主动土压力强度等于被动土压力强度,式(1)=式(2),即  $e_{az} = e_{pz}$ 。

$$(p_{az} + q_z) \cdot k_a - 2c_k \sqrt{k_a} = p_{pz} \cdot k_p + 2c_k \sqrt{k_p} \quad (5)$$

即

$$(\gamma h_0 + \gamma_m H) \cdot k_a - 2c_k \sqrt{k_a} = \gamma h_0 \cdot k_p + 2c_k \sqrt{k_p} \quad (6)$$

得

$$h_0 = \frac{\gamma_m}{\gamma} \cdot \frac{k_a}{(k_p - k_a)} \cdot H - 2c_k \cdot \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{1}{(\sqrt{k_p} - \sqrt{k_a})} \quad (7)$$

式中:  $e_{az}$ 、 $e_{pz}$  为深度  $z$  处主、被动土压力强度标准值, kPa;  $q_z$  为基坑底面以上主动侧深度  $z$  处由载荷引起的竖向土压力强度标准值, kPa;  $p_{az}$ 、 $p_{pz}$  为基坑底面以下主、被动侧深度  $z$  处的由上覆土层自重引起的竖向土压力强度标准值, kPa;  $z$  为计算点的深度, m;  $n$  为计算点以上的土层数;  $\gamma_i$ 、 $h_i$  为计算深度以上第  $i$  层土的天然重度(kN/m<sup>3</sup>)和厚度(m);  $\gamma$  为基坑底面下软土的天然重度, kN/m<sup>3</sup>;  $k_a$ 、 $k_p$  为主、被动土压力系数;  $c_k$  为计算深度处软土的总应力黏聚力标准值, kPa;  $\gamma_m$  为基坑底面以上土体重度加权平均值, kN/m<sup>3</sup>;  $H$  为基坑开挖深度, m。

### 2.2 被动区土体最优加固宽度的拟合分析

深厚软土区基坑工程,若基坑开挖或支护不当,基坑会沿破裂面发生垮塌事故,破裂面的最大影响深度(OC'段)为基坑坑底 C'至土压力平衡点 O 处,主动土压力的潜在破裂面 OB'(朗肯破裂面)与竖向面之间的夹角为  $45^\circ - \varphi/2$ ,如图 2 所示。基坑沿破裂面破坏时,坑底被动区土体为软土,被动区软土的侧向抗力不足,坑底产生隆起破坏,隆起破坏的范围为

A'C'段, A'C'段即为被动区加固的最佳宽度范围。基坑坑底产生隆起破坏时, 假设被动土压力存在潜在破裂面(即 OA'), 坑底沿 OA'面破坏, 潜在破裂面 OA'与竖向面之间的夹角为  $45^\circ + \varphi'/2$ 。在基坑支护设计中, A'C'段土体被认为是有效最优的坑底被动区加固横向区域土体, 即  $b_0$  为被动区土体加固的最优加固宽度, 可按式(7)计算。

$$b_0 = h_0 \cdot \tan(45^\circ + \varphi'/2) \quad (8)$$

式中:  $\varphi'$  为被动区加固土层(即水泥土)的内摩擦角, ( $^\circ$ )。

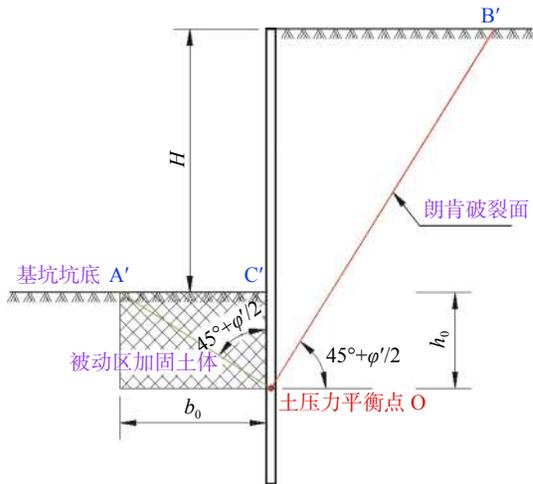


图2 被动区土体加固示意图

### 3 被动区加固范围的数值模拟分析

#### 3.1 数值试验设计

以武汉市太子湖地下车库工程场地为背景, 基坑深 6.1 m, 宽 20 m, 采用 FLAC3D 软件模拟被动区加固范围对基坑的影响, 从而探究被动区土体的最优加固深度和宽度。

图3 为数值模拟计算模型图, 考虑结构对称性, 宽取 10 m, 计算深度取 30 m。两侧边界采用水平铰支约束, 下端边界采用固定约束。周边环境复杂, 采用  $\phi 1000 @ 1300$  mm 钻孔桩(桩长 21 m)+坑底被动区加固支护。模型土层计算参数见表 1。

应用式(6)一式(7)计算,  $h_0=6.4$  m,  $b_0=7.6$  m。采用实腹式、满坑式加固, 搅拌桩水泥掺量 15%, 被动加固土参数为:  $\mu=0.25$ ,  $\gamma=22$  kN/m<sup>3</sup>,  $c=60$  kPa,  $\varphi'=10^\circ$ ,  $E=70$  MPa。

#### 3.2 被动区土体加固范围对基坑的影响

经数值模拟计算分析, 被动区坑底土体加固后, 基坑的一些指标(如抗剪强度指标、承载力)发生明显的改良, 整个基坑的位移量明显减小, 相应的地面沉降、支护桩侧向变形均得到有效控制。

以被动区土体最优加固深度和宽度的拟合方法

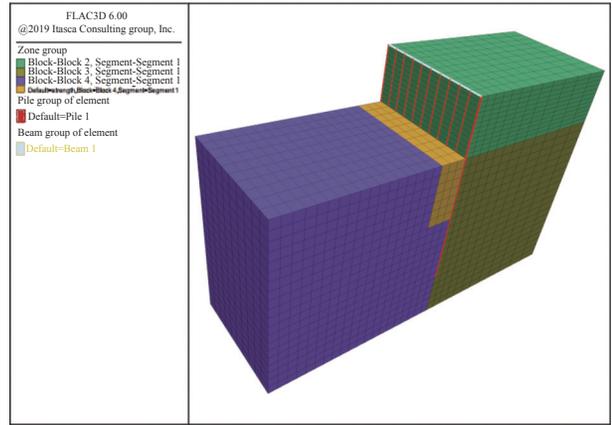


图3 数值模拟中的计算模型图

表1 模型土层计算参数表

土层名称	$\mu$	厚度/m	$\gamma$ /(kN·m <sup>-3</sup> )	$c$ /kPa	$\varphi$ ( $^\circ$ )	$E_{s1-2}$ /MPa
杂填土	0.15	1.6	18.0	8	18	5.0
淤泥	0.42	3.9	16.2	10	4	2.0
淤泥质土	0.40	10.6	16.6	12	5	3.5
黏土	0.30	13.9	19.6	30	15	8.5

计算出的  $h_0$ 、 $b_0$  为基点, 通过数值模拟来分析坑底土体加固范围变化对地面沉降、支护桩侧向变形的影响, 进而验证最优加固深度、宽度的拟合计算公式可行性。

#### 3.2.1 加固深度的影响

图4、图5、图6 分别为不同加固深度时的支护桩侧向变形沿深度的变化曲线、地面沉降最大值与加固深度的关系曲线、坑底土体的坑底隆起曲线, 加固宽度为 7.5 m, 加固深度为 0、2.5 m、4.5 m、6.5 m、8.0 m、9.5 m 和 12.5 m。

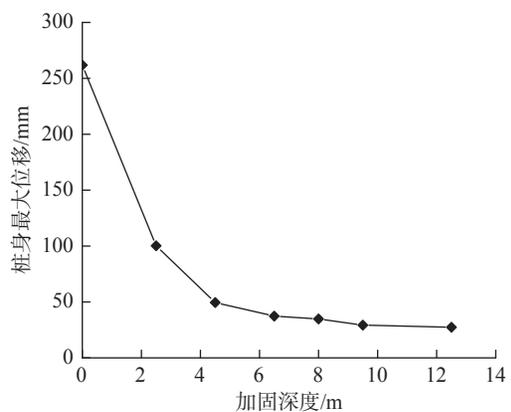


图4 不同加固深度时的桩身最大位移

从图4 可以看出, 桩身最大水平位移(桩顶处)随着被动区加固深度的增大而减小。加固深度在 0~6.5 m 时, 支护桩最大水平位移降低幅度较大; 加固深度超过 6.5 m 时, 支护桩最大水平位移随加固深

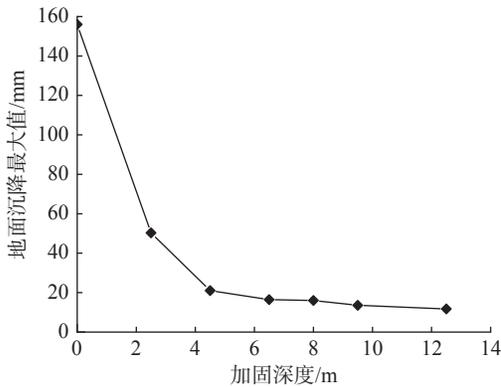


图5 不同加固深度时的地面沉降最大值

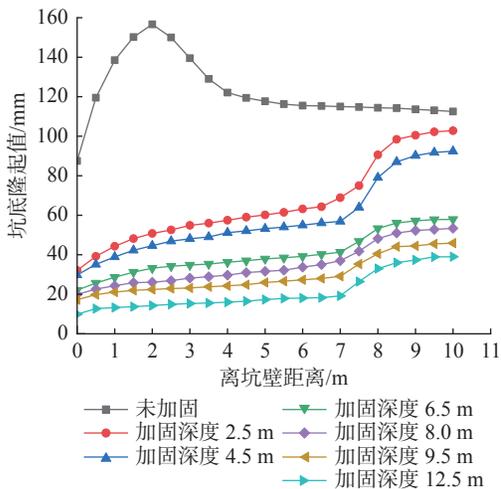


图6 不同加固深度时的坑底土体隆起曲线

度的增加而降低的幅度较小,即增大被动区加固深度对支护桩最大水平位移影响已不明显。

从图5可以看出,加固深度为0时,地面沉降最大值为155.98 mm,随着坑底加固深度的增大,地面沉降最大值急剧变小,加固深度到6.5 m时,趋于稳定值。

从图6可以看出,坑底土体加固后,坑底隆起值明显减小,随着加固深度的增大,坑底隆起值逐渐减小;且加固深度为6.5 m时,坑底隆起值大幅度减小,加固深度超过6.5 m时,坑底隆起值随加固深度的增加而降低的幅度较小。距离坑壁小于7.5 m,坑底隆起值较小,坑底隆起值得到有效控制,距离坑壁超过7.5 m,坑底隆起值突变,大幅度增大,即7.5 m宽的加固区对未加固区的坑底隆起的影响控制有限。因此,被动区最优加固深度可认定为6.5 m。

### 3.2.2 加固宽度的影响

图7、图8、图9分别为不同加固宽度时的支护桩侧向变形沿深度的变化曲线、地面沉降最大值与加固宽度的关系曲线、坑底土体的坑底隆起曲线,加固深度为6.5 m,加固宽度为0、3.0 m、6.0 m、7.5 m、

8.5 m、9.0 m和10.0 m。

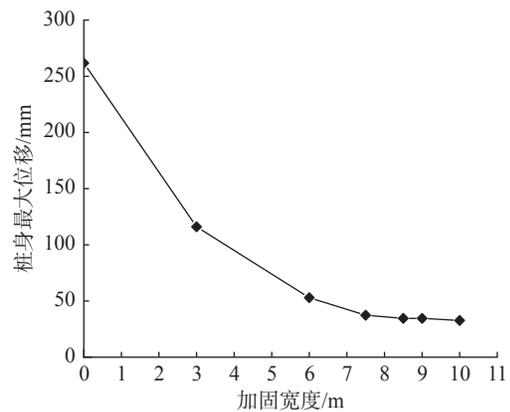


图7 不同加固宽度时的桩身最大位移

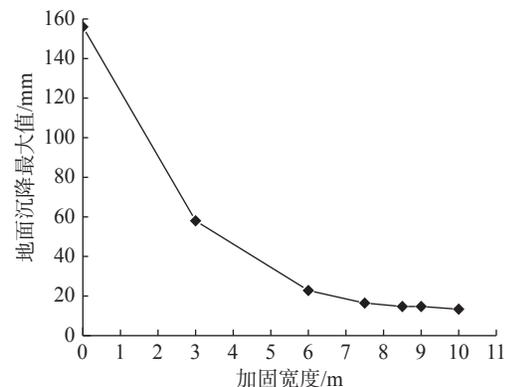


图8 不同加固宽度时的地面沉降最大值

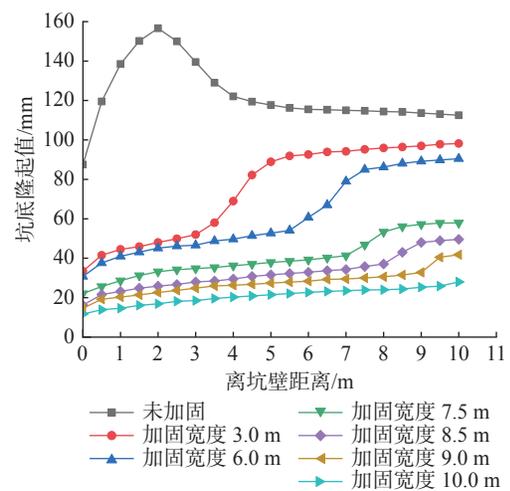


图9 不同加固宽度时的坑底土体隆起曲线

从图7可以看出,随着被动区加固宽度的增大,桩身最大水平位移(桩顶处)不断减小。加固宽度在0~7.5 m时,支护桩最大水平位移降低幅度较大;加固宽度超过7.5 m时,支护桩最大水平位移随加固宽度的增加而降低的幅度较小,即增大被动区加固宽度对支护桩最大水平位移影响已不明显。

从图8可以看出,加固宽度为0时,地面沉降最大值为155.98 mm,随着坑底加固深度的增大,地面

沉降最大值急剧变小, 加固宽度到 7.5 m 时, 趋于稳定值。

从图 9 可以看出, 坑底土体加固后, 坑底隆起值明显减小, 随着加固宽度的增大, 坑底隆起值逐渐减小; 加固宽度为 7.5 m 时, 坑底隆起值大幅度减小, 加固宽度超过 7.5 m 时, 坑底隆起值随加固宽度的增加而降低的幅度较小。离坑壁距离小于加固宽度时, 坑底隆起值较小, 坑底隆起值得到有效控制, 离坑壁距离超过加固宽度时, 坑底隆起值突变, 大幅度增大, 即加固区对未加固区的坑底隆起的影响控制有限。因此, 被动区最优加固宽度可认定为 7.5 m。

#### 4 工程实测结果分析

武汉市太子湖地下车库工程的基坑被动区土体加固范围为  $h=6.5$  m、 $b=7.5$  m; 基坑支护施工完成后, 开始进行支护桩水平位移和地表沉降监测, 在基坑四侧各选取一个监测点进行实测结果分析, 监测点分别为 E1、S2、W3、N4, 现场实测监测结果见图 10 和图 11。

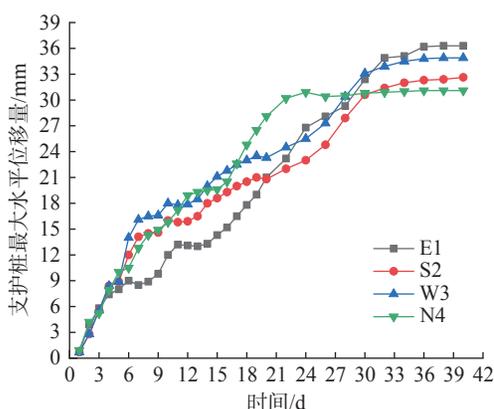


图 10 支护桩最大水平位移监测曲线

监测成果显示, 基坑开挖至支护体变形保持稳定期间, 监测点 E1、S2、W3、N4 处的支护桩最大水平位移量分别为 36.33 mm、32.63 mm、34.90 mm、31.10 mm, 最大沉降量分别为 16.55 mm、15.91 mm、16.25 mm、15.45 mm, 见图 10 和图 11。

采用 FLAC3D 软件对基坑被动区加固进行模拟分析, 支护桩最大水平位移量为 37.36 mm, 最大沉降量为 16.43 mm; 采用理正深基坑 7.5 软件进行分析计算, 支护桩最大水平位移量为 34.86 mm, 最大沉降量为 18.00 mm。实测值与模拟值、计算值对比分析, 三者的支护桩最大水平位移量、最大沉降量均相差不大, 基本吻合; 且被动区土体加固范围与式(6)、式(7)计算的最优加固深度 6.4 m 与宽度 7.6 m 也基本吻合; 证实被动区土体加固深度 6.5 m、加固宽度 7.5

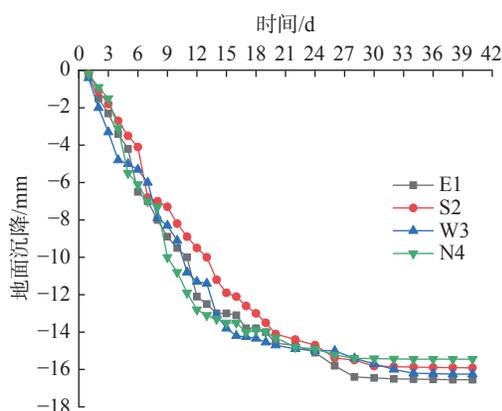


图 11 地面沉降监测曲线

m 时, 基坑支护达到了设计计算的效果, 模拟、计算也准确地预测了基坑变形量。

#### 5 结论

(1) 对于基坑变形要求严格的深厚软土区的基坑工程, 采用被动区土体加固能有效控制围护结构的变形位移。

(2) 维持一定的加固宽度不变而改变加固深度时, 随着加固深度的逐渐增大, 坑底隆起逐渐减小, 支护桩最大水平位移、地面最大沉降明显减小; 加固深度达到一定数值后, 支护桩最大水平位移、地面最大沉降趋于某一稳定值, 可认定该加固深度为最优加固深度。

(3) 加固深度固定而使加固宽度逐渐增大时, 支护桩最大水平位移、地面最大沉降明显减小, 加固宽度达到一定数值后, 趋于某一稳定值, 可认定该加固宽度为最优加固宽度。随着加固宽度的增大, 坑壁侧的坑底隆起值明显降低, 高隆起区范围也逐渐缩小。

(4) 运用本文理论方法推算的式(6)、式(7)对软土区悬臂桩支护结构进行被动区土体加固深度与宽度设计, 经多个工程实例的验证, 实际的支护效果均能满足设计及规范要求, 可为深厚软土区基坑被动区土体加固设计提供参考。

(5) 从式(6)、式(7)可以看出, 被动区土体最优加固深度  $h_0$  受基坑开挖深度、土体的重度和抗剪强度影响; 最优加固宽度  $b_0$  受被动区土体加固深度和加固土层的内摩擦角影响。在各土层参数及加固土内摩擦角一定时, 最优加固深度与基坑开挖深度、最优加固宽度与加固深度均呈一般的线性递增关系。

#### 参考文献

- [1] 李凌峰, 魏海涛. 软土地区基坑被动区水泥土加固范围对支护体位移影响分析[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(6): 321-323.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 杨敏, 朱碧堂. 超载软土地基主动加固控制邻近桩基侧向变形分析[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(4): 76-84.
- [6] 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.
- [7] 刘俊岩, 孙美云, 刘燕. 滨河相软弱土层坑内土体加固效果分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(S1): 671-676.
- [8] 龚晓南, 高有潮, 徐少曼. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [9] 贾坚. 土体加固技术在基坑开挖工程中的应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, 3(1): 132-137.
- [10] 郭亚磊, 江辉煌. 基坑被动区软土层加固宽度的数值分析[J]. *铁道建筑*, 2017, (2): 105-108.
- [11] 颜超, 孙廉威, 程子聪. 深基坑开挖与周边既有建筑物改造相互影响研究[J]. *建筑科学与工程学报*, 2021, 38(6): 80-89.
- [12] 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.
- [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.
- [14] 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.
- [15] 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.

收稿日期: 2021-12-30