

深厚软弱地层坑内土体加固 对支护结构变形的影响

王启云^{1,2}, 林华明¹, 臧万军^{1,2}, 张丙强^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 为分析基坑内侧土体加固对支护结构水平位移的影响规律, 将加固体及未加固土体视为复合土体, 以弹性地基梁法为基础建立支护结构的杆系有限元模型, 结合工程实例计算分析土体加固参数对支护结构水平位移的影响。结果表明, 支护结构水平位移随加固深度的增加而减小, 且存在临界深度。当加固体的水泥掺量在 0~15% 范围内增加或置换率在 0~0.5 范围内增加, 支护结构水平位移显著减小, 加固效果显著; 当水泥掺量大于 15% 或置换率大于 0.5, 支护结构水平位移变化较小, 加固效能降低。

关键词: 富水软弱地层; 基坑; 土体加固; 水平位移

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2018)01-0008-05

Effects of soil reinforcement on the deformation of the retaining structure of foundation pits in deep water-soaked soft stratum

WANG Qiyun^{1,2}, LIN Huaming¹, ZANG Wanjuan^{1,2}, ZHANG Bingqiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to analyze the influence of the reinforcement on the horizontal displacement of the retaining structure of foundation pits, the reinforced soil and the original soil were considered as a composite soil body. Based on the elastic foundation beam theory, a finite element analysis model of the bars in the retaining structure was established. The effects of soil reinforcement parameters on the horizontal displacement were calculated and analyzed with engineering projects. The research results show that the horizontal displacement of the retaining structure reduces with the increase of the reinforcement depth, and there is a critical depth. When the cement content of the reinforced body increases within the range of 0~15% or its replacement rate increases within the range of 0~0.5, the horizontal displacement of the retaining structure is significantly reduced and achieved good reinforcement effects. When the cement content exceeds 15% or its replacement rate is greater than 0.5, there is little change in the horizontal displacement of the retaining structure and the reinforcement efficiency is significantly reduced.

Keywords: water-soaked soft stratum; foundation pit; improvement of soil; horizontal displacement

由于沿海地区软土特殊的工程性质, 导致深基坑在开挖过程中常出现支护结构变形过大、周围地表沉降及坑底隆起等现象^[1]。工程实践表明, 在软土地场单纯依靠支护结构不能有效地控制基坑变形^[2], 导致工程事故频发。由于被动区加固可以显著改善软土的物理力学性质指标, 从而达到控制支护结构侧向变形和地面沉降目的, 近年来土体加固在基坑工程实践中得到了广泛运用^[3]。在加固时, 合理确定坑内土体的加固参数如加固深度、水泥掺量、置换率等是设计的关键。

目前, 国内外学者采用现场测试、数值计算、理论分析等^[3-4]方法对被动区土体加固后支护结构变形与地表沉降进行了研究。但由于软土基坑变形影响因素众多且关系复杂, 工程技术人员对其影响认知程度还相对不够, 关于被动区加固后基坑变形特征及其影响因素研究工作仍滞后于工程实践, 坑内土体加固对基坑变形的影响规律还不明确, 现有研究不能完全满足基坑工程的设计、施工需要。基于此, 本文将基坑内侧加固体和相邻土体视为复合地层, 根据土体强度等效原理计算加固后坑内土体强度指标和水平地基抗力系数的比例系数, 以弹性地基梁法为基础, 建立基坑支护结构弹性杆系有限元模型, 结合工程实例分析土体加固参数对支护结构水平位移的影响。研究结果可为富水深厚软弱地层中基坑内侧土体加固的设计与施工提供理论依据和参考。

1 计算原理与方法

1.1 计算原理

工程实践中, 软土地区的深基坑工程大多采用支撑式或锚拉式支护结构, 将开挖面以上的土体卸除, 挡土结构可采用平面杆系结构弹性支点法进行分析, 其实质就是将基坑开挖面以下的地基视为弹性地基^[5], 假定支点力为不同水平刚度系数的弹簧, 将挡土结构如地下连续墙或排桩视为竖直的弹性地基梁, 计算模型如图 1 所示。

作用在支护结构外侧的水平荷载按朗肯主动土压力理论计算, 当需要严格限制支护结构的水平位移时, 支护结构外侧的水平荷载可取静止土压力。基坑开挖面以下支护结构内侧的水平荷载按规范推荐的“ m ”进行计算^[6], 即

$$p_s = m(z - h)v + p_{s0} \quad (1)$$

式中, p_s 为作用在挡土构件上分布土反力 (kPa); v

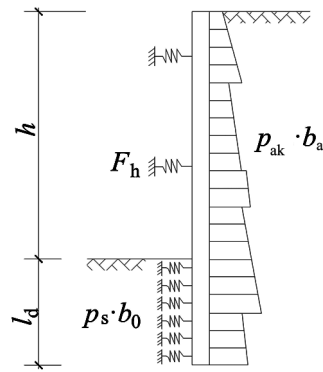


图 1 支护结构计算的弹性地基梁模型

Fig.1 Elastic foundation beam model for calculating the retaining structure

为计算点水平位移 (m); m 为土水平反力系数的比例系数 (kN/m⁴); z 为计算点距离地面深度 (m); h 为基坑开挖深度 (m); p_{s0} 为初始土反力强度 (kPa)。

1.2 计算方法

对于锚拉式或支撑式结构, 参照水平荷载作用下弹性桩, 考虑不同的开挖工况, 开挖面以上和开挖面以下支挡结构的挠曲微分方程^[5]如下:

$$EI \frac{d^4 v}{dz^4} + F_h - p_{ak} \cdot b_a = 0 \quad (0 \leq z \leq h) \quad (2)$$

$$EI \frac{d^4 v}{dz^4} + F_h + p_s b_0 - p_{ak} \cdot b_a = 0 \quad (z > h) \quad (3)$$

式中, EI 为支护结构计算宽度的抗弯刚度; z 为计算点距离地面的深度 (m); b_0 为土反力计算宽度 (m); b_a 为水平荷载计算宽度 (m); p_s 为作用在挡土结构上的分布反力 (kPa); p_s 为作用在挡土结构上外侧水平荷载 (kPa); F_h 为内支撑或锚杆对支挡结构计算宽度内的弹性支点水平反力 (kN)。

由于式 (2)、(3) 无法取得解析解, 采用杆系有限元法求解。求解过程中, 将挡土结构视为梁单元, 沿竖向每隔 1~2 m 划分计算单位, 在结构的截面、荷载突变、土体水平反力系数、地下水水变化、开挖面及锚杆或支撑处均作为节点处理^[7]。

1.3 等效 m 值的确定

工程实践中, 采用高压旋喷桩或搅拌桩对基坑内侧软土进行加固。根据强度等效原理, 把加固桩体和桩间土等效为均质复合体, 把桩均匀地

弥散到整个加固区域,求得加固区域的等效强度指标。复合体抗剪强度指标 c_{sp} 、 φ_{sp} 按以下公式计算^[8]:

$$c_{sp}=fc_p+(1-f)c_s$$

(4)

$$\varphi_{sp}=\arctan(f\tan\varphi_p+(1-f)\tan\varphi_s)$$

(5)

式中, c_p 为加固体水泥土黏聚力(kPa); φ_p 为加固体水泥土内摩擦角($^{\circ}$); c_s 为原土体黏聚力(kPa); φ_s 为原土体内摩擦角($^{\circ}$); f 为加固体置换率。

加固区域复合土体水平抗力系数的比例系数 m' 为^[6]:

$$m'=\frac{0.2\varphi_{sp}^2-\varphi_{sp}+c_{sp}}{v_b}$$

(6)

式中, v_b 为支挡结构在基坑底面处的水平位移量(mm)。

当加固深度范围内有多层土时,第 i 个开挖工况,基坑开挖面以下加固体的 m 分布如图 2。

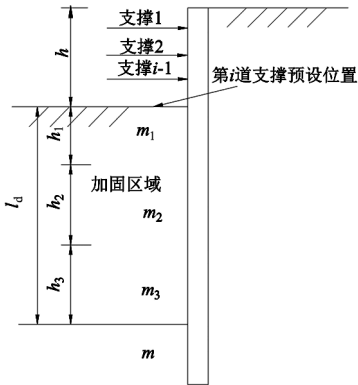


图 2 m 值分布图

Fig.2 Distribution of m along the depth

为方便计算,将多层土的水平抗力系数进行等效。等效水平抗力系数的比例系数 m' 可参考《建筑桩基技术规范》(JGJ94-2008)^[9] 进行计算:

$$m'=\frac{m_1h_1^2+m_2(2h_1+h_2)h_2+m_3(2h_1+2h_2+h_3)h_2}{l_d^2}$$

(7)

式中, m_1 、 m_2 、 m_3 为加固深度范围内加固后各土层水平反力系数的比例系数; h_1 、 h_2 、 h_3 为加固深度范围内土层厚度; l_d 为加固深度。

2 工程应用

厦门市地铁 2 号线某车站基坑标准段开挖深

度 16.83 m,宽度 20.7 m,支护结构采用厚度 800 mm 的地下连续墙,共设 4 道支撑,第 1 道钢筋混凝土支撑截面尺寸为 1 m×1 m,第 2 道钢支撑外径 609 mm,壁厚 12 mm,预加力 800 kN,第 3 道和第 4 道钢支撑外径 800 mm,壁厚 12 mm,预加力 1 000 kN。内支撑依次设置在地面以下 0、4.5、7、11.5 m 处。地下水位于地表以下 2 m,地面超载取 20 kPa。场地土体分层情况和物理力学参数指标如表 1。由于基坑内侧存在厚度约 13 m 的淤泥层,为保证基坑开挖顺利进行,拟采用 $\phi 650$ mm@450 mm 三轴搅拌桩对坑内淤泥层进行加固,初步设计每隔 3 m 抽条加固宽度为 3 m。由直剪试验得到水泥掺量为 15% 的水泥土抗剪强度指标 $C_p=150$ kPa, $\varphi_p=20^{\circ}$ 。

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of different soil layers

岩土名称	h / m	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c_s / kPa	φ_s / ($^{\circ}$)	m / ($\text{MN}\cdot\text{m}^{-4}$)
素填土	0~3.0	18.2	15	15	4.50
淤泥	3.0~15.3	16.4	10	4	0.92
残积砂质黏性土	15.3~17.4	18.3	22	24	11.32
全风化花岗岩	17.4~20.6	18.4	26	25	12.60
散体状强风化花岗岩	20.6~31.0	19.2	35	28	16.38

计算中设置 7 个工况,从工况 1~7 依次为开挖至 5 m、施加第 2 道支撑、开挖至 7.5 m、施加第 3 道支撑、开挖至 12 m、施加第 4 道支撑、开挖至 16.83 m。利用 FSPW 软件,计算不同工况下,支护结构最大侧向位移如图 3 所示。

从图 3 可以看出,随着开挖深度的增加,支护结构最大水平位移总体上在逐步增加,在开挖过程中支护结构最大位移出现在工况 5。加固后,支护结构水平位移在开挖过程中显著降低,工况 1~4 支护结构的最大侧向水平位移仅为加固前的 30%左右。由于坑底以上的加固土体在开挖过程中被逐步挖除,因此支护结构的位移在加固前后逐步趋于一致。基坑开挖深度范围内的土体加固对支护结构最终的水平位移基本没有影响。

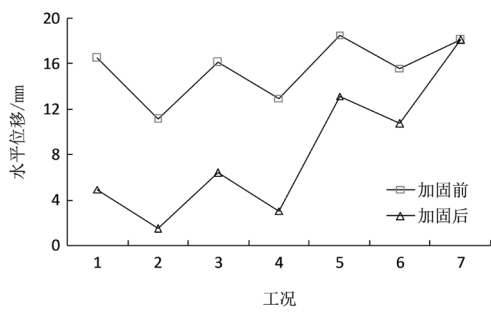


图 3 支护结构最大侧向位移随工况的变化规律
Fig.3 Variation of maximum lateral displacement of the retaining structure with working conditions

3 加固参数对支护结构位移的影响

由于本文工程实例中淤泥处于基坑开挖深度范围内,为进一步分析加固参数对支护结构变形的影响,选择工况 2 和 3 的支护结构最大水平位移进行分析。

3.1 加固深度对支护结构位移的影响

支护结构最大水平位移与加固深度的关系如图 4。可以看出,支护结构的最大水平位移随土体加固深度的增加而显著减小,但当加固深度超过 6 m 后,支护结构水平变化幅度较小。说明基坑内侧土体加固存在临界深度,超过临界深度加固效能显著降低,因此工程实践中应通过计算确定合理的加固深度。

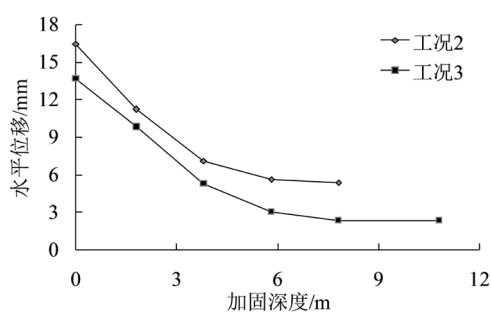


图 4 支护结构最大水平位移与加固深度的关系
Fig.4 Relationship between the maximum horizontal displacement of the retaining structure and the reinforcement depth

3.2 水泥掺量对支护结构位移的影响

为研究基坑内侧加固土体中水泥掺量对基坑变形的影响,参考文献[10]根据试验提出的淤泥水泥土黏聚力与水泥掺量成线性关系,内摩擦角

与水泥掺量成指数关系,即:
$$c_p = c_1 + A(x_2 - x_1) \quad (8)$$
$$\varphi_p = \varphi_1 e^{Bx_2} / e^{Bx_1} \quad (9)$$

式中, x_1 、 x_2 为水泥掺量; c_1 、 c_p 分别为与 x_1 、 x_2 对应的加固体黏聚力 (kPa); φ_1 、 φ_p 分别为与 x_1 、 x_2 对应的加固体内摩擦角 (°); A 、 B 为计算参数。

根据工程实例中的参数,由式(8)、(9)反分析得到 $A=9.33$, $B=0.1073$ 。

将式(8)代入式(4)、式(9)代入式(5),获得加固区土体等效抗剪强度指标,进而计算获得考虑水泥掺量的基坑内侧加固区的等效水平抗力系数的比例系数 m' 值。

分析表明,本文计算条件下加固临界深度为 6 m,取加固深度为 6 m 时进行计算。支护结构最大水平位移与水泥掺量关系曲线如图 5 所示。

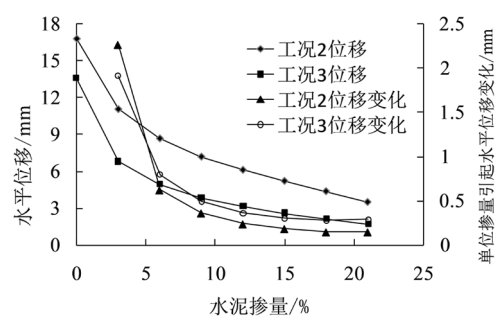


图 5 支护结构最大水平位移与水泥掺量关系
Fig.5 Relationship between the maximum horizontal displacement of the retaining structure and the cement content

由图 5 可知,随着加固区水泥掺量增加,支护结构最大水平位移迅速减小。当水泥掺量在 0~15% 范围内增大时,每增加单位百分比的水泥掺量,支护结构水平位移变化速率迅速降低,加固效果显著降低,当水泥掺量大于 15% 时,增加单位水平掺量,支护结构水平位移变化速率变化较小,单位水泥掺量加固效能基本不变。分析表明,当水泥掺量小于 15% 时加固效果显著,水泥掺量大于 15% 后加固效能明显降低。

3.3 置换率对支护结构位移的影响

加固深度为 6 m、水泥掺量为 15% 时,支护结构最大水平位移与基坑内侧加固体置换率的关系曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,随着坑内加固体置换率在 0~0.5 范围内的增加,支护结构水平位移迅速减小,

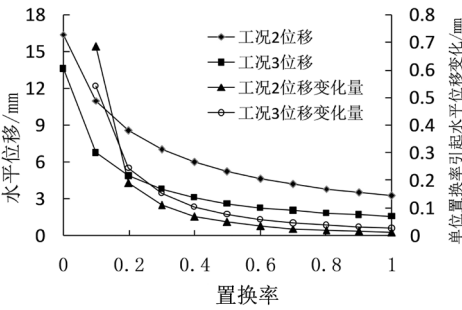


图 6 支护结构最大水平位移与置换率的关系

Fig.6 Relationship between the maximum horizontal displacement of the retaining structure and the replacement rate

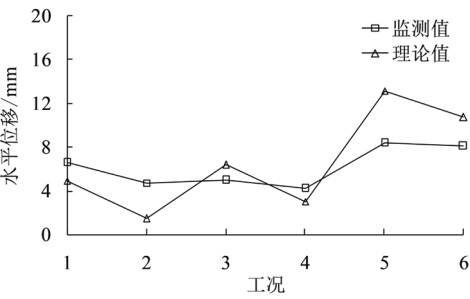


图 7 现场监测结果

Fig.7 Monitoring results on site

置换率每增加 0.1,引起的位移变化量也显著降低。当置换率在 0.5~1.0 范围内增加时,支护结构水平位移变化速率显著降低,置换率的增加引起的位移变化量很小且基本一致。分析表明,当置换率低于 0.5 时,土体加固效果显著,当置换率大于 0.5 时,土体加固效能显著降低。

通过上述分析,提出在厦门市地铁 2 号线某车站基坑内侧土体加固时,加固深度取工况 3 以下 6 m,即从淤泥层顶面往下 10.5 m,水泥掺量取 15%,置换率取 0.5。

现场监测工作与开挖同步进行,现场监测结果如图 7 所示。可看出,在开挖过程中支护结构最大累计位移约为 8.4 mm,远小于设计报警值 30 mm,加固效果良好,且监测数据与理论分析结果较为接近,表明本文计算得出的加固参数合理。

参考文献:

[1] 张立明,朱敢平,郑习羽,等.软土地区深基坑对临近地铁结构影响的实测与分析[J].岩土工程学报,2017,39(S2): 175-179.

[2] 史世雍.软土地区深基坑支护体系安全性状动态分析[D].上海:同济大学,2007.

[3] 夏建中,罗战友,龚晓南.基坑内土体加固对地体沉降的影响分析[J].岩土工程学报,2008,30(S1):212-215.

[4] 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(06):119-123.

[5] 熊智彪.建筑基坑支护[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[6] 中国建筑科学研究院.建筑基坑支护技术规程:JGJ120-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.

[7] 罗战友.基坑内土体加固对围护结构内力的影响分析[C].中国水利学会.第一届中国水利水电岩土力学与工程学术讨论会论文集:下册.北京:中国水利学会,2006:866-867.

[8] 顾长存,刘胜松.堤防水泥土搅拌桩复合地基稳定分析及应用研究[J].防灾减灾工程学报,2005,25(3):330-334.

[9] 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范:JGJ94-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

[10] 李振龙,潘殿琦,杨书红,等.海相淤泥特性水泥土搅拌桩强度影响因素及其变化规律的试验研究[J].长春工程学院学报(自然科学版),2015,16(3):16-19.

4 结论

- 1) 基坑内侧软弱土体的加固能显著降低支护结构的水平位移,随着加固深度的增加水平位移减小,且加固深度存在一个临界值,超过临界深度,坑内土体加固效能显著降低。
- 2) 加固体的水泥掺量在 0~15% 范围内增大时,支护结构水平位移显著减小,加固效果显著;当水泥掺量大于 15% 时,随着水泥掺量的增加支护结构水平位移变化量较小,加固效能明显降低。
- 3) 加固置换率在 0~0.5 范围内增大时,支护结构位移迅速减小,加固效果显著;当置换率大于 0.5 时,支护结构水平位移变化较小,加固效能显著降低。
- 4) 加固深度、水泥掺量、置换率等参数对支护结构水平位移影响较大,因此,在工程实践中应合理确定加固参数,在保证基坑安全的同时又能节省工程造价。