

DOI: 10.11779/CJGE2021S2006

# 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析

秦会来, 黄俊, 李奇志, 胡立新, 史一剑

(中国建筑第二工程局有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 珠海地处珠三角南部前缘, 具有非常典型的软土地质条件, 受沉积环境等多种因素影响, 珠海软土物理力学性状与天津、杭州等地的软土相比, 具有淤泥层厚度大、变化大, 含水量更高, 孔隙比更大, 压缩性更大, 强度明显偏低等突出特点。依托珠海横琴口岸及综合交通枢纽功能区项目深基坑工程, 运用有限元技术探讨了该地区深厚淤泥地层条件下基坑的变形特点, 系统分析了坑内加固区范围、支护桩嵌固深度、支护桩刚度等因素对基坑变形的影响及影响规律, 总结了该深基坑的变形控制措施及控制效果。以期为该地区深厚淤泥地层中的深基坑设计和施工提供指导。  
**关键词:** 深基坑; 变形控制; 坑底加固; 支护桩刚度; 深厚淤泥; 嵌固深度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0023-04

作者简介: 秦会来(1979—), 男, 高工, 博士, 主要从事岩土与地下工程的设计、施工与研发。E-mail: huilaiqin@163.com。

## Influencing factors for deformation of deep foundation pits in thick mud stratum

QIN Hui-lai, HUANG Jun, LI Qi-zhi, HU Li-xin, SHI Yi-jian

(China Construction Second Engineering Bureau Ltd., Beijing 100160, China)

**Abstract:** Zhuhai is located at the southern front of Pearl River Delta and has very typical soft soil geological conditions. Affected by various factors such as sedimentary environment, the physical and mechanical properties of Zhuhai soft soils are different from those of Tianjin and Hangzhou soft soils. The mud stratum in Zhuhai is characterized by large thickness, great variation, higher water content, larger void ratio, greater compressibility and obviously lower strength. Based on the deep excavation project for comprehensive traffic hub of Hengqin Port, the deformation characteristics of foundation pit under thick mud stratum in this area are discussed by using the finite element method. The influences of soil improvement area, embedded depth and stiffness of retaining piles on the deformation of deep foundation pit are analyzed. The deformation control measures and effects of the deep foundation pit for comprehensive traffic hub of Hengqin Port are summarized. It is expected to provide guidance for the design and construction of deep foundation pits in thick mud stratum in this area.

**Key words:** deep excavation; deformation control; pit improvement; stiffness of retaining pile; thick mud stratum; embedment depth

## 0 引言

随着国家粤港澳大湾区战略的逐步实施, 珠海城市地下空间工程得到了快速发展, 深基坑作为地下空间开发利用的前提条件, 呈现出深、近、群、难等特点。珠海地处珠三角南部前缘, 具有非常典型的软土地质条件。目前, 已有不少学者对我国软土地层中的深基坑变形特点和变形控制做过系统总结<sup>[1-3]</sup>, 但由于受沉积环境等多种因素影响, 软土的物理力学性状表现出较强的地域特性, 不同软土地区的基坑性状和变形控制效果也必然存在差异。试验研究表明<sup>[4]</sup>, 珠海地区软土与天津、杭州、南京等地相比, 呈现出淤泥层厚度大, 含水量更高, 孔隙比更大, 压缩性更强, 强度明显偏低等突出特点。受深厚淤泥地层的影响, 珠海等珠三角地区深基坑变形特点明显不同, 变形控

制难度更大。

鉴于当前对珠海地区深厚淤泥层中的深基坑变形控制问题尚缺少系统的研究和总结, 本文将依托珠海横琴口岸及综合交通枢纽功能区项目, 探讨深厚淤泥地层中深基坑的变形特点, 坑内加固范围、支护桩嵌固深度以及支护桩抗弯刚度等对基坑变形的影响及影响规律。在基坑变形影响因素系统分析的基础上, 总结了该工程中深厚淤泥位置深基坑变形的控制效果。

## 1 工程概况

珠海横琴口岸及综合交通枢纽功能区项目地下

基金项目: 中国建筑第二工程局有限公司科技研发课题  
(91110000100024296D170011)

收稿日期: 2021-08-13

空间开发面积巨大, 基坑开挖面积约 13.5 万  $\text{m}^2$ 。该项目一级基坑开挖最大深度为 13.6 m, 坑中管廊区域二级基坑开挖深度为 18.2~21.6 m。基坑支护设计采用了排桩+钢筋混凝土内支撑的形式, 考虑到基坑工程规模大、形状复杂, 且淤泥地层中深基坑时空效应明显等, 基坑采取了分区施工方式。根据地勘报告, 场地内淤泥层的分布厚度为 10.00~26.40 m, 淤泥层厚度最大位置为与澳门城轨地下站台紧接处, 本文也将以该位置基坑剖面作为珠海地区深厚淤泥地层中的典型代表进行分析计算, 探讨深厚淤泥地层中深基坑变形特点以及各种变形控制措施对基坑变形的影响, 该位置基坑支护剖面如图 1 所示。

如图 1 所示, 该位置处, 基坑开挖深度 13.6 m, 最终选定的支护方案为  $\Phi 1600@1800$  灌注桩结合三道钢筋混凝土内支撑。围护桩桩底位于地表下 47.5 m, 也即支护桩在基坑底面以下的嵌固深度为 33.9 m, 围护桩混凝土强度等级为 C30; 三道混凝土支撑的截面尺寸均为 1500 mm $\times$ 1200 mm, 支撑混凝土强度等级为 C40。坑内被动区加固范围为坑底以下 8 m, 水平宽度 8.05 m。为严格控制该位置处支护体系的变形, 实际施工中仅考虑人员通行的活荷载。

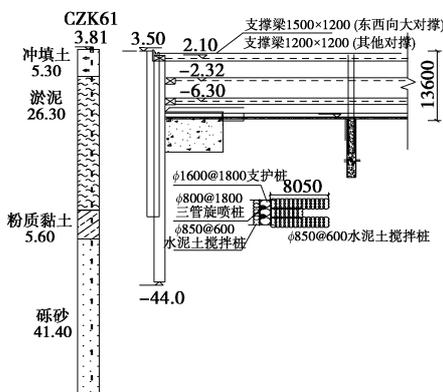


图 1 典型深厚淤泥地层基坑剖面图

Fig. 1 Typical profile of retaining piles in thick mud stratum

## 2 有限元中的土体模型参数

目前, 有限元仍是分析基坑工程变形问题的最佳选择。实践经验表明<sup>[5]</sup>, 土体的小应变硬化模型(HSS)能够较好考虑土体的硬化特征, 能区分加荷和卸荷的差别, 土体刚度依赖于应力历史和应力路径的特点, 以及小应变条件下的土体刚度特点等, 是模拟土体开挖问题的合适选择。有鉴于此, 本文将基于土体的HSS模型对上述图 1 中的典型基坑剖面进行各种工况下的计算与分析。

依据地勘报告提供的固结不排水剪切数据、压缩模量等, 参考文献[5]中的研究成果, 以及根据本文依

托基坑工程变形实测结果的反演分析<sup>[6]</sup>, 本文基坑工程中所采用的小应变硬化参数取值见表 1 所示。对于坑内水泥土搅拌桩加固区域的土体, 考虑到水泥土搅拌桩的物理力学特点, 采用以莫尔库仑为屈服准则的理想弹塑性模型进行模拟。根据本工程淤泥地层中水泥土桩的无侧限抗压强度设计值, 以及水泥土桩的面积置换率等, 模型参数取值如下: 黏聚力取为 120 kPa, 内摩擦角取为 22°, 弹性模量取为 90 MPa。

表 1 HSS 模型土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils in HSS model

层号	①	②	③ <sub>1</sub>	③ <sub>4</sub>	④ <sub>2</sub>
土层名称	填土	淤泥	粉质黏土	砾砂	强风化花岗岩
平均厚度/m	5.3	26.3	5.6	41.4	4.6
$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18.7	16.3	19.3	20.9	21
$E_{50}/\text{MPa}$	4.6	2	5	20.4	19
$E_{ode}/\text{MPa}$	4.6	2	5	10.2	19
$E_{ur}/\text{MPa}$	27.6	8	30	122.4	76
$c'/\text{kPa}$	20.4	4.6	15.1	1	25
$\phi'/(^{\circ})$	14.4	2.4	26.9	33.5	35
$m$	0.5	0.8	0.8	0.5	0.5
$\gamma_{0.7}/(10^{-4})$	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
$G_0/\text{MPa}$	83	40	90	367	345

## 3 深基坑变形控制措施的影响与分析

### 3.1 坑内加固的影响

本节中将探讨不同的坑内加固体范围对支护体系变形的影响。计算中支护桩以及支撑参数与图 1 所示一致, 只考虑坑内加固区域几何尺寸的变化影响。

图 2 中给出了不进行坑内被动区加固, 以及坑内加固区深度 8 m、加固宽度不同条件下, 支护桩水平侧移曲线以及地表沉降曲线的变化情况。图 2 中, 坑内加固区宽度为 8 m 的工况与本工程中采取的加固范围情况基本一致。对比图 2 中“无加固”与进行加固的各变形曲线, 可以发现, 无论是支护桩的水平侧移还是地表的沉降, 进行坑内被动区加固, 可以明显减小支护体系的变形量。由图 2 (a) 中支护桩水平位移曲线可以发现, 对于本工程中的深厚淤泥地层, 支护桩桩身最大水平位移发生在坑底以下约 0.4 倍的基坑开挖深度处, 且随着坑内加固区宽度的增加略有加深。由图 2 (b) 可见, 基坑地表最大沉降发生在约 1.15 倍的基坑开挖深度位置, 且随着坑内加固体宽度的增加略有后移。地表沉降的显著影响范围为 2.4~3 倍基坑开挖深度。

从图 2 可以发现, 当坑内加固深度为 8 m 时, 加固体宽度超过 8 m 后, 坑内加固对减小支护体系变形的效果明显下降。图 3 中给出了不同坑内加固深度条件下, 支护桩最大水平位移随坑内加固体宽度的变化情况。由图 3 可以发现, 不同加固深度下, 均表现

出支护桩最大水平位移随加固体宽度增加而降低幅度放缓的现象。从图 3 中各加固体深度下曲线的拐点位置也可以发现, 加固体深度越大, 拐点对应的加固体宽度也有加大的趋势。

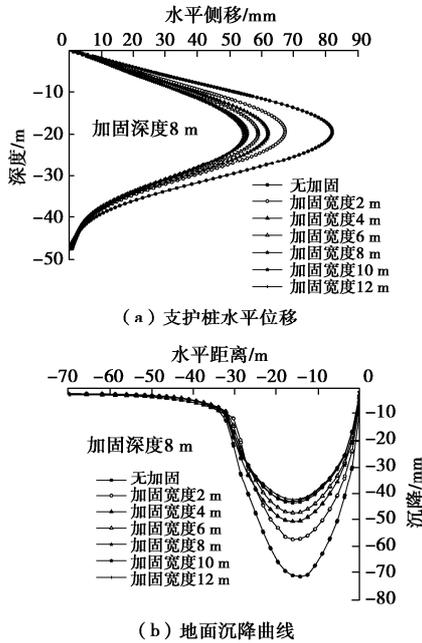


图 2 不同加固体宽度下的变形曲线

Fig. 2 Deformation curves for soil improvement with different widths

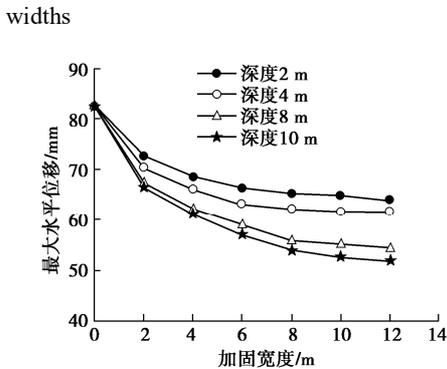


图 3 加固体宽度对支护体系最大水平位移的影响

Fig. 3 Influences of soil improvement width on maximum horizontal displacement

### 3.2 支护桩嵌固深度的影响

上海、天津、南京等软土地区基坑围护结构的插入比的大致范围为 0.45~1.52, 绝大多数处于 0.70~1.00 之间<sup>[6]</sup>, 而本基坑工程中该剖面位置的围护结构插入比达到了 2.5。根据《广东省建筑基坑工程技术规程 (DBJ/T15—20—2016)》, 图 1 所示基坑剖面支护桩的嵌固深度主要由基坑踢脚稳定性控制, 当支护桩嵌固深度为 24 m 时, 已经能满足规范要求, 此时插入比为 1.76。以下将探讨深厚淤泥地层中, 支护桩嵌固深度对支护体系变形的影响。图 4 中给出了坑内无

加固以及坑内加固体几何尺寸与本工程实际一致情况下, 不同支护桩嵌固深度条件下支护桩的水平位移曲线。由图 4 可见, 增大支护桩嵌固深度可以降低支护体系的最大水平位移, 同时随着嵌固深度的增加, 支护桩最大水平位移位置略有上移。对于坑内没有加固的情况, 支护桩嵌入砾砂层 6 m 后, 才可显著降低支护桩的最大水平侧移量, 嵌入砾砂层超过 8 m 后对支护桩的最大水平位移降低量已经不明显; 对于坑内加固体宽度和深度均为 8 m 的情况, 支护桩进入砾砂层 4 m 即可显著降低支护桩最大水平位移, 支护桩进入砾砂层 6 m 后, 对降低支护桩最大水平位移的效果减弱, 但与无加固情况相比, 效果仍比较好。

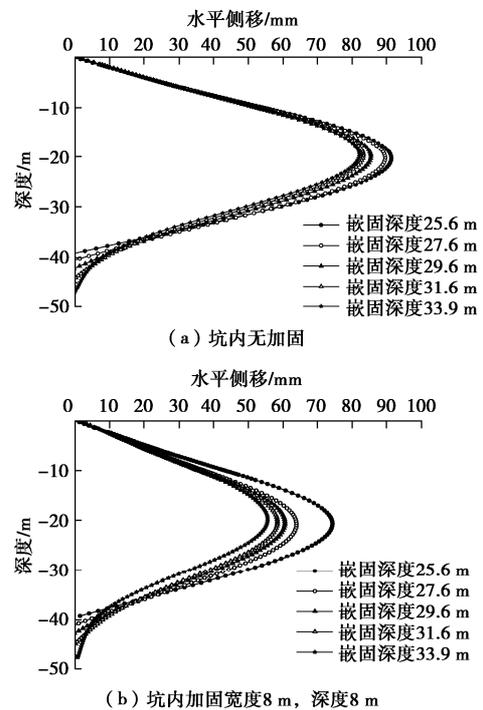


图 4 支护桩水平位移随嵌固深度的变化

Fig. 4 Variation of horizontal displacement of retaining piles with embedded depth

### 3.3 支护桩刚度的影响

图 5 中给出了支护桩桩径为 1000~1600 mm, 桩间净距在 200 mm、400 mm 间变化时, 支护桩水平位移曲线的变化情况。由图 5 可见, 增加支护桩墙的抗弯刚度可以有效地降低支护桩的外鼓变形, 但当支护桩桩径大于 1400 mm 时, 随着支护桩刚度的增加, 支护桩最大水平位移降低幅度减弱。

## 4 本工程基坑变形控制效果

根据《广东省建筑基坑工程技术规程 (DBJ/T15—20—2016)》相关规定, 图 1 所示基坑断面的最大水平位移需要控制在 50 mm 以内, 但考虑到深厚淤泥地层中变形控制难度大, 代价高, 且该位置基坑周边环

境相对简单,在经过多轮专家讨论后,同意对该区域基坑变形控制适当放松。为了达到深厚淤泥位置处深基坑变形控制目标,本工程最终选定了图1中所示的支护参数。对于图1中的支护参数,由本文有限元计算支护桩的最大水平位移为55.63 mm,本工程的实测结果表明,基坑开挖完成后该位置围护结构的最大水平位移为52 mm,基坑及周边环境均安全有效,从侧面验证了本文计算成果的合理性。

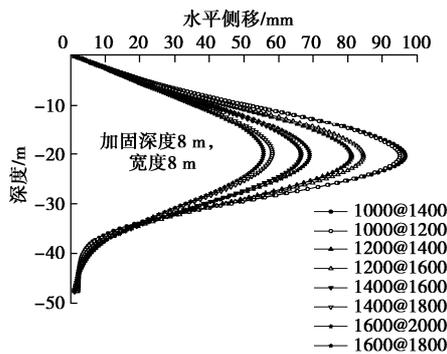


图5 不同桩径桩间距下的支护桩水平位移曲线

Fig. 5 Curves of horizontal displacement of retaining piles with different pile diameters and spacings

## 5 结 论

对于珠海地区深厚淤泥地层中的深基坑工程,通过以上的计算分析,可以得出结论如下:

(1) 坑内加固的范围存在高效影响区,当加固几何尺寸超出这一范围后,增加加固区的范围对支护变形的降低幅度不明显。

(2) 支护桩桩身最大水平位移位置随着坑内加固区宽度的增加略有加深。基坑地表最大沉降发生在约1.15倍的基坑开挖深度位置,地表沉降的显著影响范围为2.4~3倍的基坑开挖深度。

(3) 增大支护桩墙嵌固深度可以降低支护体系的最大水平位移,同时随着嵌固深度的增加,支护桩最大水平位移位置略有上移。

(4) 增加支护桩墙的抗弯刚度可以有效地降低支护桩的外鼓变形。但超过一定值后,降低幅度减弱。

### 参考文献:

[1] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连

续墙的变形性状[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 81 - 86.

(XU Zhong-hua, WANG Jian-hua, WANG Wei-dong. Deformation behavior of diaphragm walls in deep excavations in Shanghai[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 81 - 86. (in Chinese))

[2] 万星, 戈铭, 贺智江, 等. 南京软土地区基坑墙体变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 85 - 88. (WAN Xing, GE Ming, HE Zhi-jiang, et al. Characteristics of deformation of retaining wall due to deep excavation in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 85 - 88. (in Chinese))

[3] 廖少明, 魏仕锋, 谭勇, 等. 苏州地区大尺度深基坑变形性状实测分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(3): 458 - 469. (LIAO Shao-ming, WEI Shi-feng, TAN Yong, et al. Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(3): 458 - 469. (in Chinese))

[4] 宋许根, 王志勇, 柏威伟, 等. 珠海西部中心城区大面积深厚软土工程特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1434 - 1451. (SONG Xu-gen, WANG Zhi-yong, BAI Wei-wei, et al. Study on engineering characteristics of large-scale deep soft soil in central area of western Zhuhai[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1434 - 1451. (in Chinese))

[5] 梁发云, 贾亚杰, 丁钰津, 等. 上海地区软土HSS模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 269 - 278. (LIANG Fa-yun, JIA Ya-jie, DING Yu-jin, et al. Experimental study on parameters of HSS model for soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 269 - 278. (in Chinese))

[6] 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(9): 2514 - 2524. (CHEN Xiao-qing, DING Wen-qi, QU Hong-bo, et al. Influence of insertion ratio of large-diameter piles in deep mud stratum on deformation characteristics of foundation pit in Zhuhai[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(9): 2514 - 2524. (in Chinese))

(编校: 明经平)