

紧邻地铁车站基坑双排桩支护结构性状分析

初振环，陈 鸿，王志人，陈发波

(深圳市市政设计研究院有限公司，广东 深圳 518029)

摘要：基于某紧邻地铁车站地下结构的深基坑支护工程，分别采用有限元法和解析公式法分析了坑后存在地铁车站侧向边界条件下基坑双排桩支护结构变形特征和土压力分布情况及其对地铁结构的安全影响。总结了此种情况下双排桩的土压力分布规律，并提出了弹性抗力法计算模型。通过对某工程实例的计算结果分析得出一系列关于双排桩结构性状的结论，计算结果得到了实测数据的验证。

关键词：地铁保护；深基坑；双排桩；土压力

中图分类号：TU47 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2012)S0-0474-06

作者简介：初振环(1981-)，男，山东海阳人，硕士，高级工程师，主要从事基坑、边坡工程及地基处理等方面的设计与研究工作。E-mail: chuzh@szmedi.com.cn。

Behavior of retaining structure with double-row piles for deep excavations subway stations

CHU Zhen-huan, CHEN Hong, WANG Zhi-ren, CHEN Fa-bo

(Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518029, China)

Abstract: Based on the supporting project of a deep excavation close to the underground structure of a subway stations, the deformation characteristics and distribution of the earth pressure as well as their effects on the subway structure of retaining structure with double-row piles are analyzed by means of the FEA method and the analytical formula. The distribution of the earth pressure's on double-row piles applicable to such situations are summarized. A model based on the elastic resistance method is proposed. Through analyzing the results, a series of conclusions for characters of double-row piles are drawn. The calculated results are verified by use of the measured data.

Key words: subway protection; deep excavation; double-row pile; earth pressure

0 引言

目前随着城市地铁的建成通车，其沿线往往成为商业、住宅建筑等开发的黄金地带，紧邻既有地铁隧道进行施工的基坑工程越来越多。在地铁周边建筑密集区进行的基坑开挖不可避免地会对周围环境产生影响，而地铁在其运营和使用过程中对各部分的变形要求均较为严格，因此在地铁周边进行工程建设时，都需要设置一些针对性的措施来保障地铁的安全及正常运营。

基坑悬臂双排桩支护结构目前已广泛应用于深度不大，变形控制相对较高的基坑支护工程中，它具有控制变形能力强的特点，避免了大面积基坑布置内支撑造价高、工期慢、施工难度大的缺点。因此，悬臂双排桩对于 10 m 深度以内、土质较好、紧邻地铁的基坑支护工程具有很强的适用性。

目前对于双排桩支护结构的研究主要采用有限元法和弹性抗力法。

在弹性抗力法方面，刘泉生等^[1]建立了考虑桩土效应的双排桩平面杆系有限元模型。接着围绕双排桩平面杆系有限元模型的关键参数土压力分布及弹性抗力系数展开了研究，提出了采用位移反分析优化方法获得弹性抗力参数的取值。白冰等^[2]建立一个考虑空间效应的深基坑双排桩支护结构计算模型。并基于这一模型，编制了设计计算软件并分析了冠梁对于双排桩结构的影响。黄凭等^[3]通过一假想剪切滑裂面，将双排桩支护结构人为分为上下两部分。滑裂面上下两部分分别采用体积比例法和 m 法求解土压力，在此基础上建立各段桩体的挠曲微分方程。根据各段桩体端点在几何变形和内力上的连续性关系以及相应的边界条件可得到各段挠曲微分方程的解。从而求解双排桩内力变形。应宏伟等^[4]总结了目前基于弹性土抗力法的双排桩支护结构常用计算模型，分别编制了平面杆

系有限差分法计算程序, 介绍了双排桩支护结构在某实际工程中的应用, 比较了一些模型之间计算结果的差异。通过与实测数据的对比, 提出了较为合理的模型, 并对双排桩支护结构的诸多影响因素进行了计算分析。

在有限元法方面史海莹等^[5]采用通用有限元软件对双排桩支护的深基坑开挖进行模拟。研究地基土模量随深度增加的情况下, 不同排距时的桩身侧移和土压力的分布, 分析排距、桩长、系梁高度、桩间土以及被动区土体模量对桩顶侧移的影响。

而对于紧邻地铁车站、地下室结构等地下构筑物的情况下, 即通常所说的“土条状坑壁”, 双排桩后破裂面受到地下构筑物的限制, 其土压力分布规律明显不同于一般情况, 目前国内未见相关研究的报导。

本文在前人研究基础上, 针对某一紧邻地铁车站的基坑工程实例, 分别采用有限单元法和土条状坑壁土压力解析法分析受地下构筑物影响的双排桩土压力分布情况, 用有限元法计算双排桩和地铁结构的位移情况。根据两种方法计算的土压力, 提出简化的适用于紧邻地下构筑物的双排桩土压力模型, 基于弹性抗力法, 编制了有限差分法程序, 对于该工程实例进行计算, 通过已有的位移实测数据对该方法进行验证。

1 工程实例

1.1 工程概况

金和成广场地下室基坑位于深圳地铁 5 号线五和站南侧, 基坑面积 1.9 万 m², 车站主体结构水平净距约 5.36~8.64 m, 邻近车站范围基坑深度 8.5 m, 临近区间隧道侧基坑深度 10~14 m, 地铁车站底板底标高比本项目基坑底深约 9.5 m, 区间隧道轨道面比基坑底深约 6.5 m。基坑与地铁平面相对关系如图 1 所示。

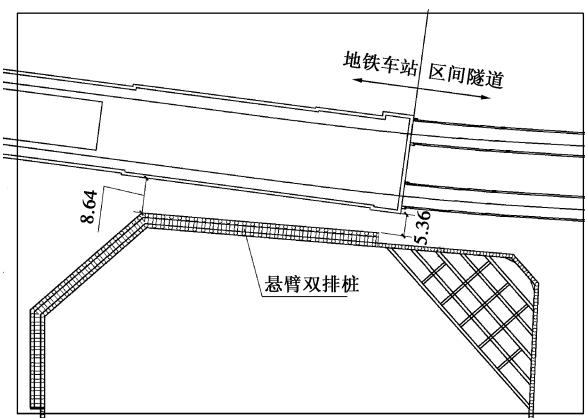


图 1 基坑与地铁平面位置关系图

Fig. 1 Relationship between plane position of excavations and subway

1.2 工程地质条件

基坑所在场地主要受力层的物理、力学指标详见表 1。基坑中下部主要为硬塑状含砾粉质黏土和砾质黏性土, 地质情况较好。

表 1 各土层物理力学指标和计算参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of subsoils

土层	重度 γ (kN·m ⁻³)	变形 模量 E_0 /MPa	泊 松 比 ν	黏 聚 力 c /kPa	内摩 擦角 ϕ (°)	水平抗力 比例系数 m (MN·m ⁻⁴)
人工 填土	18.0	10	0.4	15	13	2.5
含砾粉 质黏土	19.0	25	0.33	20	17	6
砾质黏 性土	19.0	35	0.3	28	20	10
全风化 花岗岩	20.0	80	0.28	30	25	12
强风化 花岗岩	21.0	130	0.25	20	35	15

1.3 基坑支护方案

基坑面积较大, 深度不大, 土质情况较好, 但是距离地铁结构较近, 地铁结构变形控制要求高, 深圳地区要求地铁车站、隧道结构水平位移累计值不超过 5 mm。为了严格控制基坑变形, 设计在临近地铁车站侧采用悬臂双排 C30 直径 1 m 钻孔灌注桩作为支护桩, 桩间布置 2 排 D550 间距 0.45 m 单轴搅拌桩作为止水帷幕, 详见图 2。基坑临近区间隧道侧的东北角采用单排钻孔桩和三道钢筋砼角撑支护。

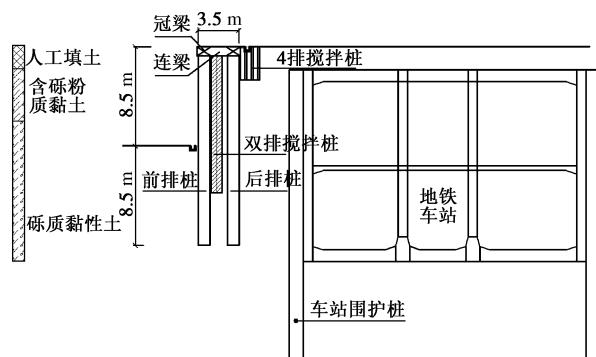


图 2 支护结构剖面图

Fig. 2 Section of retaining structure

前、后排桩直径 1.0 m, 水平间距 2.0 m, 桩长 16.2 m; 两排桩中心距 2.5 m, 桩顶设置 1.2 m×0.8 m 的冠梁, 通过 0.8 m×1.0 m 的连梁使两排桩形成整体。两排桩间采用双排水泥搅拌桩加固桩间土兼作止水帷幕, 搅拌桩桩长 12.5 m, 进入坑底约 4 m。桩后用 4 排格栅式搅拌桩加固填土区域。

2 土条状坑壁土压力解析法介绍

以上述工程为例, 坑后土呈土条状, 传统的郎肯、

库仑理论假定破裂面收到地铁车站的制约导致土压力不同于传统理论。王贤能^[6]针对这种“土条土压力”，将排桩或地连墙视为刚性体，土条宽度设为 b ，破坏楔体的受力状态见图 3 所示。

图 3 中， w 为破坏楔体的单位长度的重量 (kN)， γ 为土体的重度 (kN/m^3)， z 为计算点深度 (m)， φ 为土体的内摩擦角 ($^\circ$)， θ 为破裂角 ($^\circ$)， δ 为桩土摩擦角。

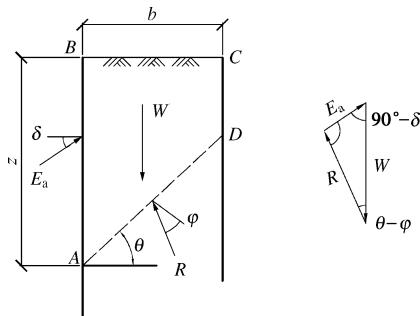


图 3 土压力计算模型

Fig. 3 Calculation model of earth pressure

根据静力平衡条件，求出土压力 E_a 函数，

$$E_a = (bz - \frac{b^2}{2} \tan \theta) \gamma \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\cos(\theta - \varphi - \delta)} \quad (1)$$

对破裂角 θ 求导，求解破坏时最大土压力可得

$$\begin{aligned} & \cos \varphi \sin(\varphi + \delta) \cdot x^2 + (\cos(2\varphi + \delta) + \cos \delta) \cdot x \\ & - (\sin \varphi \cos(\varphi + \delta) + \frac{2z}{b} \cos \delta) = 0 \quad , \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $x = \tan \theta$ 。求解出 θ 后，式 (1) 对深度 z 求导，即可求出土压力强度。

$$e_a = \frac{dE_a}{dz} = \gamma b \frac{\sin(\theta - \varphi)}{\cos(\theta - \varphi - \delta)} \quad (3)$$

提出假定的临界深度 z_{cr} ，临界深度以上采用经典土压力理论计算，临界深度以下采用式 (3) 计算。对于郎肯土压力理论，临界深度为

$$z_{cr} = b \cdot \tan(45^\circ + \varphi/2) \quad (4)$$

3 基坑平面应变有限元分析

采用商业有限元软件 Midas/GTS 对基坑开挖进行计算分析。

3.1 基本假定

(1) 计算采用平面应变问题，计算基坑开挖对邻近地铁结构的变形。

(2) 土体单元、基坑支护结构单元、地铁单元均采用平面三节点单元。

(3) 岩土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型。

(4) 考虑支护结构与土体间的相对位移，支护结

构与土体单元间增设接触单元。

(5) 迭代计算方法采用 Newton-Raphson 法。

(6) 收敛标准采用位移收敛标准。

(7) 弹塑性材料流动法则为相关联流动法则。

3.2 计算模型及网格划分

选取临近地铁车站侧典型剖面作为计算模型，模型尺寸为 85 m (长) × 30 m (高)，其中坑内计算长度 42 m，坑外计算长度 53 m。单元总数 6653 个，其中支护结构单元 308 个，地铁结构单元 485 个，接触单元 142 个，计算模型如图 4, 5 所示。

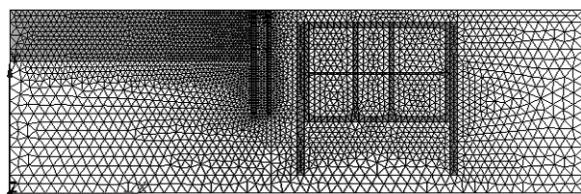


图 4 有限元计算网格

Fig. 4 Computational mesh of finite element

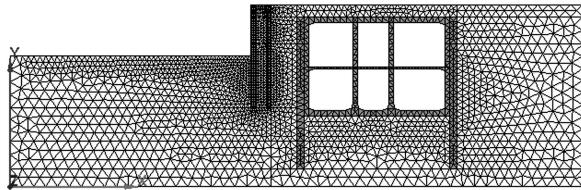


图 5 开挖到底工况有限元计算网格

Fig. 5 Computational mesh of finite element in the end

3.3 接触单元处理

计算采用允许不同材料之间或刚度相差较大的材料之间可以滑动的接触单元-Goodman 单元。使用等参数单元调节刚度到适当的数值可以实现类似于接触单元的效果，但是接触单元不必细分单元可以使用细长的单元。

接触单元的剪切应力由用户定义的接触单元的剪切刚度承担，可用于判断剪切应力是否超过了莫尔-库伦屈服标准中的最大剪切强度。超过了最大剪切强度，则残留剪切系数将被用于计算单元刚度。

3.4 计算结果

根据实际基坑施工顺序，分步计算。分别得出前、后排桩及临近基坑的地铁车站南侧墙水平位移，前、后排桩土压力强度等结果。水平位移向基坑内侧方向为正。计算结果如图 6~8 所示。

从上图可知，双排桩变形呈挠曲线分布，上大下小，前排桩最大水平位移 17.2 mm，发生在深度-4 m 处，后排桩最大水平位移 16.9 mm，发生在桩顶。后排桩受到桩间土的制约因素，其水平位移略小于前排桩。地铁车站南侧墙水平位移变化趋势与基坑支护结

构相同, 均呈现“上大下小”的趋势, 最大位移 4.8 mm, 最小位移 3.9 mm, 监测点位置水平位移 4.2 mm。

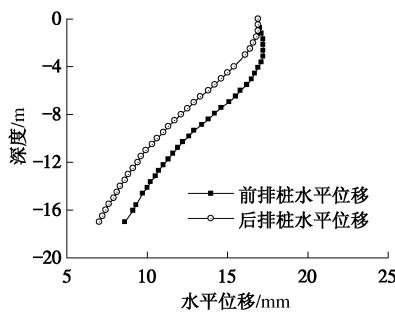


图 6 开挖到底支护结构水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of retaining structure after excavation

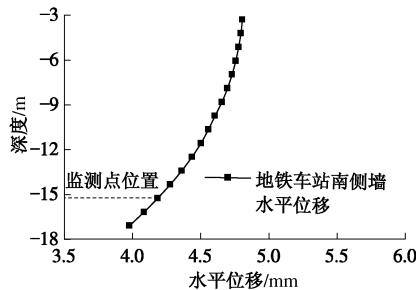


图 7 开挖到底地铁车站水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of subway station after excavation

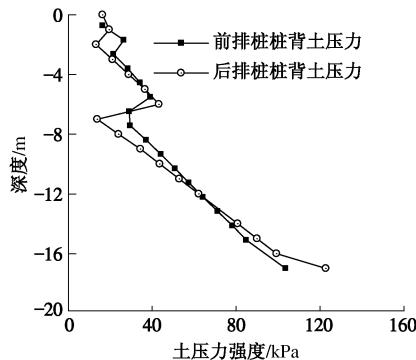


图 8 开挖到底支护结构土压力

Fig. 8 Earth pressure of retaining structures after excavation

前、后排桩土压力分布规律相近, 均在深度-7 m 处发生突变, 后排桩变化较明显。

根据基坑已有实测资料, 最终工况计算位置桩顶最大水平位移 16 mm, 地铁车站水平位移 3.9 mm。由于平面应变有限元计算未考虑基坑空间效应, 因此计算结果略大于实测数据, 但总体看计算结果与实测数据相差不大, 基本吻合。

由于有限元法受到土层参数选择以及土体本构模型的制约, 往往很难准确计算基坑变形, 在初步设计时可以采用下文提出的基于弹性抗力法的简化方法进

行计算。

4 计算模型

4.1 各种理论土压力的比较

将本工程实例作为基本算例, 分别采用土体土压力解析法、有限元数值法、郎肯土压力和静止土压力进行计算桩背土压力, 计算结果对比如图 9, 10 所示。对于本算例, 临界深度为 6.7 m。

可以看出, 在临界深度以上, 前、后排桩桩背土压力数值解位于主动土压力和静止土压力之间, 前、后排桩桩顶土压力较大, 接近静止土压力, 随着深度增加, 土压力增大趋势逐渐减小, 至临界深度位置接近主动土压力。前、后排桩在临界深度以上均接近于主动土压力与静止土压力的平均值。

在坑底以下, 前、后排桩土压力数值解均小于主动土压力, 后排桩由于受到土条宽度限制, 明显小于主动土压力。在深度-14 m 以上, 解析解土压力值大于数值解, 在深度-14 m 以下解析解土压力值小于数值解。

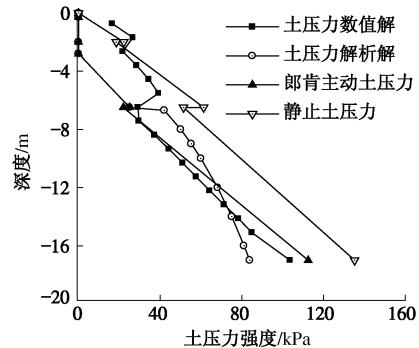


图 9 前排桩土压力对比

Fig. 9 Comparison of earth pressures on front-row piles

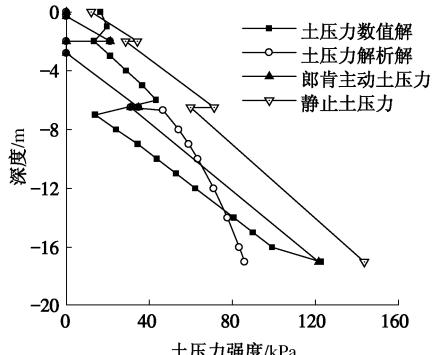


图 10 后排桩土压力对比

Fig. 10 Comparison of earth pressures on back-row piles

由于解析法计算假定忽略了地下构筑物的侧向位移, 将地下构筑物假定为固定边界与实际情况不符, 且由于其土压力函数的复杂性导致计算繁琐, 而有限

元法在初步设计时则受到参数选取、土体本构模型等因素的制约，两种方法的计算结果都不是完全准确。

综合考虑数值解和解析解的计算结果，提出新的简化土条状坑壁双排桩支护结构土压力模型。

4.2 基于弹性抗力法双排桩计算模型

弹性抗力法采用连续布置、且相互独立的土弹簧模拟桩前土体对桩的贡献，前排桩土抗力作用在开挖面以下深度，而后排桩则作用在朗肯主动滑裂面（与水平面夹角为 $45^\circ + \varphi/2$, φ 为开挖面以上土的按层厚加权平均内摩擦角）与后排桩的交点以下深度。

计算模型如图 11 所示。

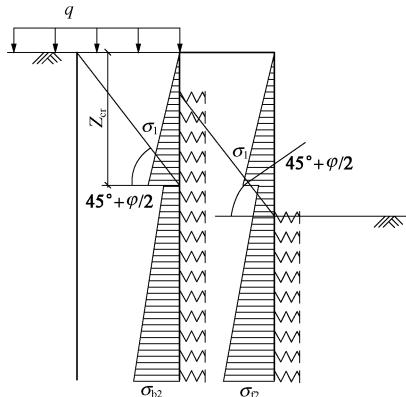


图 11 土条状坑壁双排桩计算模型

Fig. 11 Calculation model of double-row piles with soil strips

上图中， φ 为开挖面以上土的按层厚加权平均内摩擦角， z_{cr} 为土条土压力计算的临界深度， σ_1 为前、后排桩临界深度以上桩背土压力强度， σ_{12} 为前排桩临界深度以下桩背土压力强度， σ_{b2} 为前排桩临界深度以下桩背土压力强度。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\sigma_a + \sigma_0}{2} = \frac{K_a \sigma_z - 2c \cdot \sqrt{K_a} + K_0 \sigma_z}{2}, \\ \sigma_{12} &= \sigma_a = K_a \sigma_z - 2c \cdot \sqrt{K_a}, \\ \sigma_{b2} &= \alpha \cdot \sigma_a = \alpha (K_a \sigma_z - 2c \cdot \sqrt{K_a}). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中， σ_a 为郎肯主动土压力强度， σ_0 为静止土压力强度， σ_z 为计算点深度土体自重应力， K_a 为主动土压力系数， K_0 为静止土压力系数， c 为黏聚力， α 为土压力折减系数，取 $0.6 \sim 0.9$ ，土条宽度小取低值。

地基水平基床系数 K_h 取沿深度线性增加的“m”法分布，即

$$K_h = mz, \quad (6)$$

式中， z 为计算点深度， m 为地基水平抗力比例系数。

对于密排的排桩墙，用等效刚度法简化为单位宽度的连续墙。则等效连续墙的厚度 h 为

$$h = 0.838d\sqrt{d/b_k}, \quad (7)$$

式中， d 为排桩的单桩直径， b_k 为同一排桩的相邻桩

中心间距。

5 弹性抗力法计算结果

根据上述双排桩计算模型，考虑前、后排桩与连梁的变形协调，假定连梁与前、后排桩桩顶连接均为刚接，编制了有限差分法程序，对上文工程实例临近地铁车站侧典型剖面（图 2）进行了计算，计算结果如图 12 所示。

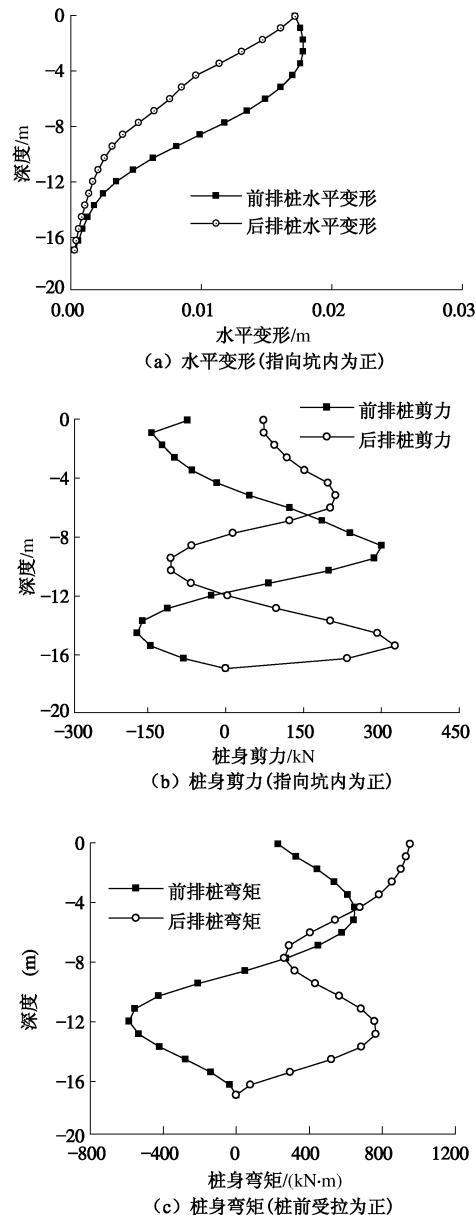


图 12 有限差分法计算结果

Fig. 12 Results of finite difference method

从计算结果可知，前、后排桩桩顶水平变形相近均为 17.2 mm ，前排桩桩身最大变形发生在深度 2 m 左右，最大变形 17.8 mm ；后排桩水平变形相比前排桩较小，最大变形发生在桩顶。

前、后排桩所受剪力方向相反，从上至下呈“波

形”分布, 在桩身上、中、下3个部位均出现较大剪力。前排桩最大剪力发生在深度-8.5 m附近, 最大值300.7 kN; 后排桩最大剪力发生在深度-15.5 m附近, 最大值326.8 kN。

由于桩顶连梁刚度较大, 导致后排桩桩顶弯矩较大(953.5 kN·m)。前排桩由于受到后排桩提供的拉力和桩顶连梁的弯矩作用, 其在坑底深度以上出现正弯矩。前排桩最大弯矩发生在深度-4.5 m附近, 最大值650.5 kN·m; 后排桩最大弯矩发生在桩顶。

根据实测数据, 最终工况桩顶水平位移16 mm, 计算结果与实测结果相近。

6 结语

对于坑后较近距离存在地下室、地铁车站等较大地下构筑物的基坑双排桩支护结构, 其受力、变形情况明显不同于传统的假定坑后土体半空间无限体条件下的理想模型。

针对具体工程实例, 综合有限元法和解析法的分析结论可知, 紧邻地铁车站结构的悬臂双排桩, 其前后排桩的桩背土压力与传统土压力理论明显不同。土压力分布存在一临界深度, 临界深度以上前、后排桩桩背土压力取主动土压力与静止土压力的平均值; 在临界深度以下, 前排桩桩背土压力取主动土压力, 后排桩桩背土压力取主动土压力的0.6~0.9倍。

并基于上述土压力理论提出了基于弹性抗力法的坑后土条有限宽度条件下双排桩支护结构简化土压力模型。

采用有限差分法编制了程序对具体工程实例进行了计算。计算结果与实测数据接近。

经计算结果分析可知: 后排桩由于桩背临界深度以下所受土压力较小, 且由于桩间土的约束作用, 其桩身中下部水平变形明显小于前排桩, 对于控制前排桩桩顶变形起到了拉锚桩的效果。

其受力性状为: 坑后土右线宽度条件下后排桩桩背土压力较小, 从而引起的负弯矩(桩背受拉)较小, 加上桩顶连梁刚度大, 使后排桩桩顶产生正弯矩(桩前受拉)较大, 设计时应加强桩顶与连梁的节点构造。

参考文献:

- [1] 刘泉声, 付建军. 考虑桩土效应的双排桩模型及参数研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 481~486. (LIU Quan-sheng, FU Jian-jun. Research on model and parameters of double-row piles based on effect of pile-soil contact [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 481~486. (in Chinese))
- [2] 白冰, 聂庆科, 吴刚, 等. 深基坑悬臂双排桩支护的受力性状研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 8: 118~124. (BAI Bing, NEI Qing-ke, WU-Gang, et al. A calculation model for double-row-pile retaining structures in deep foundation pit considering 3D effects[J]. Journal of Building Structures, 2010, 8: 118~124. (in Chinese))
- [3] 黄凭, 莫海鸿, 陈俊生. 双排桩支护结构挠曲理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(A02): 3870~3875. (HUANG Ping, MO Hai-hong, CHEN Jun-sheng. Theoretical analysis of double-row piles retaining structure deflection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(A02): 3870~3875. (in Chinese))
- [4] 应宏伟, 初振环, 李冰河, 等. 双排桩支护结构的计算方法研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1145~1150. (YING Hong-wei, CHU Zhen-huan, LI Bing-he, et al. Study on calculation method of retaining structure with double-row piles and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1145~1150. (in Chinese))
- [5] 史海莹, 龚晓南. 路堤荷载下柔性悬臂复合地基的沉降分析[J]. 工业建筑, 2009, 10: 67~71. (SHI Hai-ying, GONG Xiao-nan. Study on the behavior of cantilever double-row piles supporting deep excavation[J]. Industrial Construction, 2009, 10: 67~71. (in Chinese))
- [6] 王贤能, 邹辉, 初振环. 土条状坑壁土压力计算方法及应用分析[J]. 工程勘察, 2007, 30(11): 18~21. (WANG Xian-neng, ZOU Hui, CHU Zhen-huan. The calculation method and application analysis of earth pressure with narrow excavation-walls[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2007, 30(11): 18~21. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)