

单排桩组合双排桩支护体系设计方法研究

谢 鑫

(厦门华岩勘测设计有限公司, 福建厦门 361004)

【摘要】 随着城市化进程加快, 基坑周边环境越来越复杂, 单排桩支护结构难以满足要求时, 常配合支撑构件共同受力。而在支撑受限的区域, 采用双排乃至多排桩支护体系尤为必要。目前双排桩支护结构的接受度较为广泛, 已有成熟的设计方法。超过两排桩的多排桩虽在实践中已有应用, 但计算方法及受力模式尚未统一。以项目实践为依托, 对单排桩组合双排桩支护体系的设计方法进行系统研究, 根据桩-土协调变形分析, 认为后排桩与双排桩的协同受力主要通过斜撑实现, 计算模型简化为桩-桩协调变形, 形成后排桩、双排桩分开计算, 两者通过斜撑杆件协调变形的计算方法, 同时研究了单排桩组合双排桩支护体系等效模型法和有限元方法。结合现场监测数据进行对比分析, 验证了所提方法的合理可行性, 可为类似项目提供参考和借鉴。

【关键词】 多排桩; 支护体系; 等效模型; 数值模拟; 设计方法

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0359

Design method for retaining structure of single-row pile combined with double-row pile

XIE Xin

(Xiamen Huayan Survey and Design Co., Ltd., Xiamen 361004, Fujian, China)

【Abstract】 With the improvement of urbanization, the environmental conditions of foundation excavation are becoming increasingly complex. Single-row-pile wall as a kind of retaining structure can no longer meet requirements alone, and often work together with strut. In areas where strut is limited, the application of double-row or even multi-row pile retaining structure is very necessary. At present, the acceptance of double-row pile retaining structure is relatively wide, and there are mature design methods. Although multiple-row piles have been used in practice, the calculation method and stress mode have not yet been unified. Based on practical engineering projects, this study systematically investigates the design methodology for retaining systems that combine single-row and double-row piles. Through an analysis of pile-soil deformation compatibility, it is concluded that the synergistic load-bearing mechanism between the rear piles and the double-row piles is primarily achieved through inclined struts. The calculation model is simplified to pile-pile coordinated deformation, and a calculation method is proposed in which rear row piles and double-row piles are calculated separately with deformation coordinated by inclined strut members. Meanwhile, the equivalent model method and finite element method for this retaining system were studied. Comparative analysis with field monitoring data verifies the rationality and feasibility of the proposed method, which can provide references for similar engineering projects.

【Key words】 multiple-row piles; retaining structure; equivalent model; numerical simulation; design method

0 引言

基坑支护项目中, 排桩支护体系因具有占地空间小、基坑敞口大、土方开挖方便等优势被广泛应用^[1-2]。但随着基坑深度加大, 需要配合其它构件以控制变形。内撑式构件往往会影响施工进度、制约挖土空间; 而外延式构件往往会影响到地下埋设物的安全使用或占用红线外土地, 涉及用地的合理合法性, 限制着其在深基坑中的应用。随着排桩支护体系技

术的发展, 双排桩支护体系逐渐被接受, 已经形成了一套完整的理论体系^[3-4]。而单排桩组合双排桩支护体系虽在部分基坑支护中已有应用^[5-8], 并成功解决工程实际问题, 但由于在计算方法及受力模式方面尚未形成统一认知, 一定程度上限制了该类支护体系的大面积推广^[9-13]。

近年来国内外对单排桩组合双排桩支护体系的研究成果颇多^[13-15], 主要研究方向集中在桩-土的相

互作用、荷载传递路径以及单排桩组合双排桩在不同排距和桩径下的受力分析。虽然在理论上有一定的依据,但在实践推广上仍存在各种制约。如数值模拟的方法虽可模拟全开挖过程,分析位移场、弯矩分布等,但参数敏感性高、计算复杂;桩-土的相互作用及荷载传递路径研究可较好地反映桩-土协同变形特性^[15-17],但受土体非线性影响,结果离散性大而难以归纳,此外桩间土拱效应以及连梁刚度对荷载分摊、荷载传递影响显著,需要更深入研究才能对计算方法加以完善。

本文基于对厦门某工程单排桩组合双排桩支护体系的选型、受力机理分析、模型建立、设计计算方法选择、施工过程监测数据的分析等工作成果,对该支护体系设计方法进行归纳和总结,为其应用提供实践案例。

1 工程概况

工程场地位于厦门岛,临近海域,基坑面积 51160 m²,基坑挖深 14.1 ~ 17.5 m,属超大型基坑。场地周边均为建成区,临边存在市政道路、重点保护建筑物、文物等。基坑平面布置如图 1 所示。

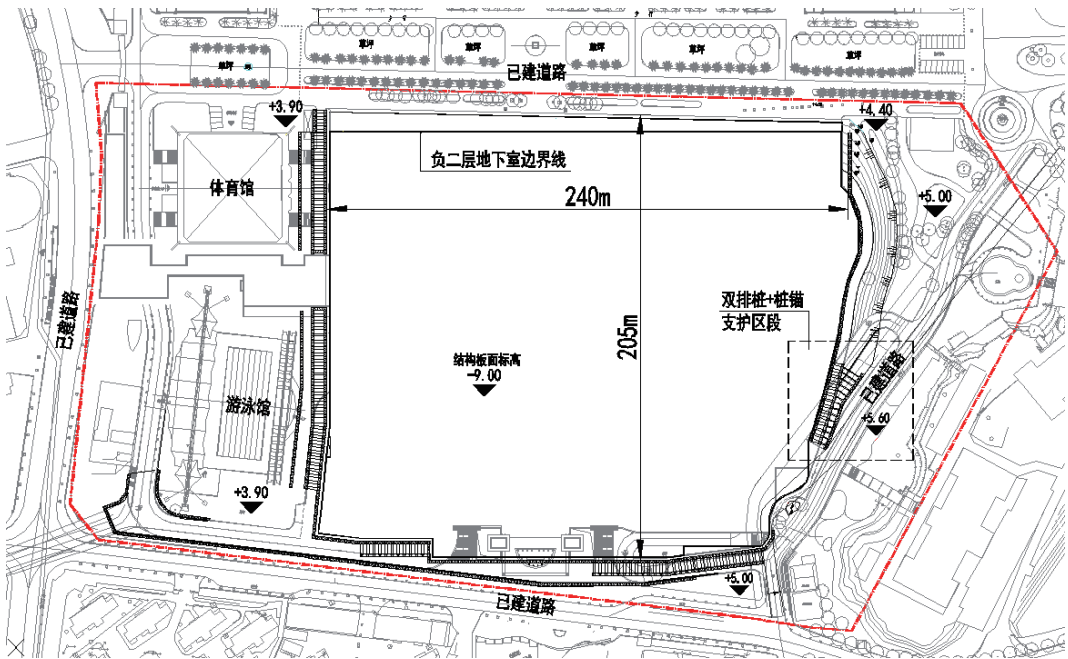


图 1 基坑平面图

Fig. 1 Plane of foundation pit

因景观需求,基坑多处设置下沉式广场、廊道,经对比分析,在场地多处设置了单排桩组合双排桩支

护体系,同步满足临时、永久支护的需求。场地土层主要参数见表 1。

表 1 主要土层参数

Tab. 1 Main parameters of the soil layer

土层	重度/(kN·m ⁻³)	压缩模量/MPa	黏聚力 <i>c</i> /kPa	内摩擦角 <i>φ</i> /(°)	<i>F_{tb}</i> /kPa
填砂	19.0	4.5	2	20	40
淤泥	16.0	2	11	2.5	15
全风化花岗岩	19.5	25	30	24	100
散体状强风化花岗岩	20.5	45	35	30	220
碎裂状强风化花岗岩	22.5		(50)	(30)	320
中等风化花岗岩	25.0		(80)	(35)	1100

注: *F_{tb}* 为土体与锚固体极限摩阻力标准值; () 内的数据为裂隙面抗剪强度指标经验值。

典型单排桩组合双排桩支护结构形式如图 2 所示,基坑总支护高度 16.6 m,受景观效果限制,在内

侧-10.00 m 标高、-4.5 m 标高设置两处平台,向外可用空间平面宽度 4 ~ 6 m,尚需支护高度 10.1 m。支

接处实现变形协同。考虑到双排桩具有加固土台及提供斜撑反力的作用,经试算得出双排桩坑底以下 0~4 m 范围为主要水平受力范围。可认为双排桩在坑底 0~4 m 以外的桩长为双排桩体系的嵌固段,设定坑底以下 4 m 位置为双排桩的刚性嵌固点,则双排桩形成单片门式刚架的水平侧向刚度约为 18 MN/m。

通过启明星软件 FRSW8.2 进行剖面计算,结果如图 4 所示。

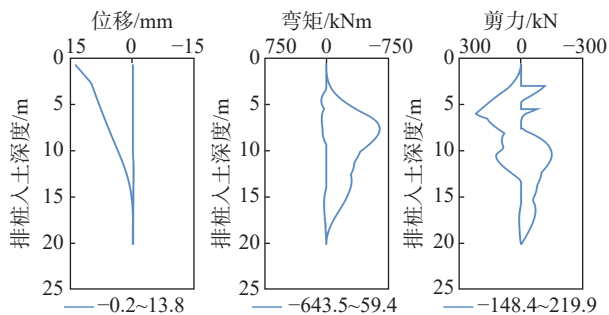


图 4 剖面计算结果

Fig. 4 Section calculation results

根据图 4 可以得到后排桩顶水平位移为 13.80 mm,斜撑支点位置的水平位移为 5.8 mm。因斜撑杆件与双排桩刚架协调变形,因此双排桩顶水平位移与斜撑支点相同。

3 对比分析

3.1 等效模型法

从图 2 可看出,支护体系结构的土台具有一定宽度,类似坑中坑的外单排桩+内单排桩受力模型。因此通过将双排桩等效为等弯曲刚度的内单排桩,并将双排桩冠梁高度范围的土体变形指标提高用于近似斜撑杆件的传力作用,利用坑中坑模型等效计算单排桩组合双排桩支护体系的变形效果。

根据弯曲刚度等效原理,可得式(1),其中圆桩直径 $D=1.0$ m,双排桩的排距 $s=4.5$ m,令等效后的方桩宽度 $b=1$ m,则等效后的方桩高度 $h=4.1$ m。通过启明星软件 FRSW8.2 进行剖面计算,结果如图 5 所示。

$$\left[\frac{\pi D^4}{64} + \frac{\pi D^2}{4} \times \left(\frac{s}{2} \right)^2 \right] \times 2 \div 1.4 = \frac{bh^3}{12} \quad (1)$$

根据图 5 可以得到后排桩顶水平位移 15.0 mm,双排桩顶水平位移 3.4 mm。因等效模型法下置斜撑支点于双排桩顶,弱化双排桩作用,故得到后排桩顶水平位移略大,而双排桩顶水平位移略小。

3.2 数值模拟法

采用迈达斯 SoilWorks5.5 二维模型计算软件进行数值模拟,基于莫尔-库仑本构模型考虑土体非线性

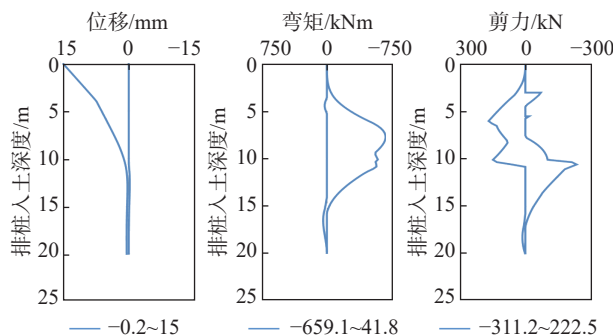


图 5 剖面计算结果

Fig. 5 Section calculation results

性行为进行土体应力变形有限元分析。

几何模型尺寸 50 m×35 m,网格划分为稠密,土体泊松比 0.3;土体弹性模量:填砂 12.5 MPa,淤泥 3 MPa,全风化花岗岩 150 MPa,散体状强风化花岗岩 375 MPa;分步开挖作业;双排桩及后排桩水平位移计算结果如图 6 所示。计算得到后排桩顶水平位移 15.68 mm,土台位置水平位移 6.25 mm。

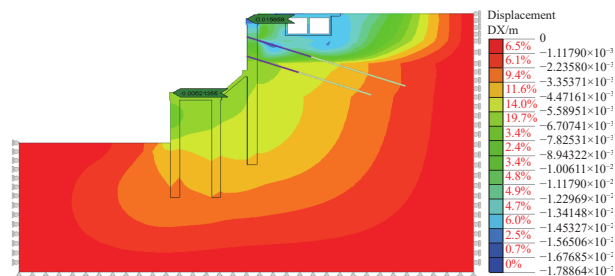


图 6 水平位移计算结果

Fig. 6 Calculation results of horizontal displacement

3.3 对比结果

本文所提设计方法得到双排桩桩顶位移 5.8 mm、后排桩位移 13.80 mm;等效模型法得到双排桩桩顶位移 3.4 mm、后排桩位移 15.00 mm;数值模拟得到双排桩桩顶位移 6.21 mm、后排桩位移 15.66 mm。分析得到后排桩水平位移变化为 13.80~15.66 mm,双排桩水平位移变化为 3.4~6.21 mm,该支护结构体系的变形均趋于一致,具有合理性。

本基坑工程开挖历时约 10 个月,通过对选定的单排桩组合双排桩范围布置 5 个水平位移监测点(P58—P59 为后排桩顶位置,其余为双排桩顶位置),通过图 7 可得双排桩桩顶水平位移量为 5.8~6.8 mm,后排桩桩顶水平位移量为 12.1~12.6 mm,现场实测变形与计算变形接近,说明支护体系受力分析及设计方法假定具有合理性。

4 适用性分析

本案例工程场地临近海域,原始地貌为滨海滩涂,基坑开挖范围填土、软土分布厚度 6.0 m 左右,

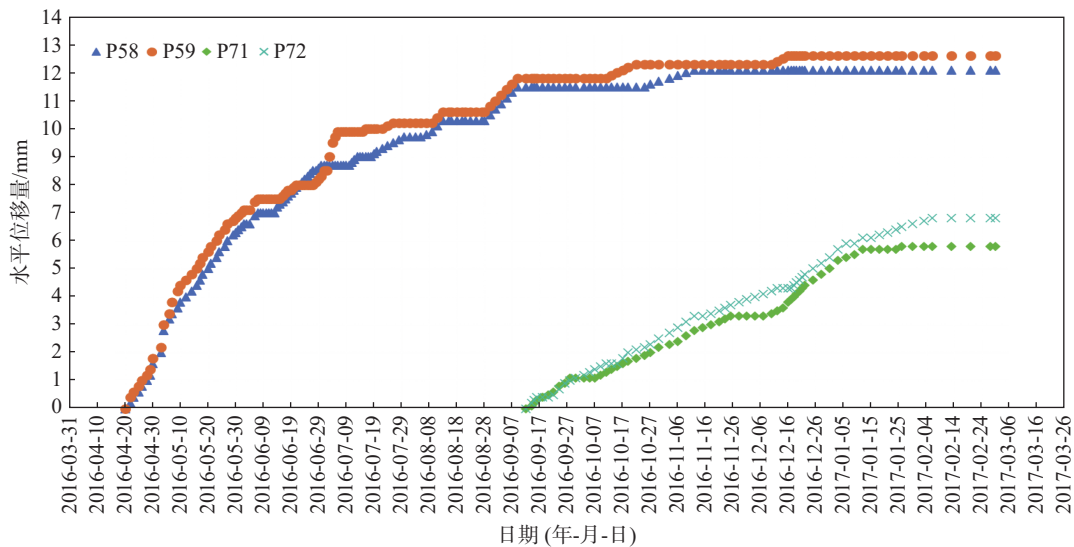


图7 水平位移监测结果

Fig. 7 Monitoring results of horizontal displacement

下部地层主要为全风化—强风化花岗岩,在工程实施中变形控制效果较好,相邻的道路及管沟未产生破坏,可见单排桩组合双排桩支护体系在地质环境、基坑周边环境两方面均具有较好的适用性。但是,单排桩组合双排桩支护体系支护结构占地空间较大,组合结构造价较高,在应用推广上有着其特定的优越性和局限性。具体分析如下:

(1)如本案例工程中组合结构占地宽度 9.0~10.0 m,其中约 5.0 m 位于车道下方,相当于占用了部分主体结构的空间。在实际工程应用上单排桩组合双排桩支护体系一般适用于用地空间较为宽松的场地、或地下室设置有分级退台的场地;另因造价高的特点,本支护体系在大面积的基坑工程上有较好的应用前景,可以解决大面积基坑支护采用内支撑造价高、土方开挖工效低的难题,又可兼顾经济性与安全性。

(2)地质条件好、没有软土分布的基坑工程,若地下室只有 1~2 层,一般挖深不超过 10 m,可供选择的支护形式很多,如放坡、土钉墙、复合土钉墙、单排桩、双排桩等;有软土分布时,单排桩、双排桩或者桩+锚支护的形式占主要地位。对于 3~4 层地下室的基坑工程,挖深约 15~20 m,地质条件、环境条件较为复杂的,一般需要采用排桩结合内支撑体系的基坑工程中,单排桩组合双排桩支护一般可参与对比选型,如果基坑面积较大时,本结构体系有明显优势,可在软土、填土厚度不超过 10 m、基坑挖深 15~20 m 的场景推广应用。当基坑开挖深度在 10~15 m,若其他结构形式受限,或者地下室本身有退台设计,可选择本组合结构。当基坑挖深超过 5 层地下室时,

本支护结构的适用能力不足,其安全性相较排桩+多层内支撑有明显差距,不建议使用。

5 结论

(1)实践证明单排桩组合双排桩支护体系在大型基坑工程中作用显著,既能解决无法采用内支撑的难题,又可兼顾经济性与安全性。

(2)单排桩组合双排桩支护体系可以通过切分单元进行计算,再通过力传递、变形协调将整个支护体系的计算结果组合成一体,其中主(被)动区域土体压缩、孔压升高所产生的对各单元体系的影响可以忽略,取相对不利的变形控制桩身强度及配筋,可以覆盖上述影响所产生的附加作用,保障安全。

(3)等刚度换算的方法可以应用在多排桩需要采用力传递方法计算的场景,计算过程简单明确,具备可操作性和参考性。

参 考 文 献

- [1] 朱 华, 邓成发. 门架式双排桩围护结构的三维有限元分析 [J]. 工程勘察, 2011, 39(1): 20-24. (ZHU H, DENG C F. 3D finite element analysis of portal double row piles[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, 39(1): 20-24. (in Chinese))
- [2] ZHOU H Z, ZHENG G, HE X P, et al. Numerical modelling of retaining structure displacements in multi-bench retained excavations[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(9): 2691-2703.
- [3] 聂庆科, 王英辉. 深基坑双排桩支护结构合理设计参数的数值模拟 [J]. 工程勘察, 2008(S2): 154-158. (NIE Q K, WANG Y H. Numerical simulation of reasonable design parameters of double-row pile support structure in

- deep foundation pit[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008(S2): 154-158. (in Chinese))
- [4] CUI X Y, LI Z P, HE H F, et al. Observed characterization of multi-level retaining structure for deep excavation of subway station[J]. *Urban Rail Transit*, 2024, 10(2): 89-106.
- [5] 刘 腾, 李兆平, 赵天标, 等. 地下交通枢纽多级基坑组合支护结构体系设计及变形特性研究 [J]. *铁道标准设计*, 2024, 68(8): 122-129. (LIU T, LI Z P, ZHAO T B, et al. Study on the design and deformation characteristics of multi-stage foundation pit in underground transportation hub with combined support structure system[J]. *Railway Standard Design*, 2024, 68(8): 122-129. (in Chinese))
- [6] 崔向阳, 何华飞, 王佳豪, 等. 紧邻高铁站多级深基坑支护结构一体化设计分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2024, 20(S2): 783-792. (CUI X Y, HE H F, WANG J H, et al. Integrated design and analysis of multi-level deep foundation pit support structure adjacent to high-speed railway station[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2024, 20(S2): 783-792. (in Chinese))
- [7] WANG R S, YANG H, NI P P, et al. Model test and numerical simulation of a new prefabricated double-row piles retaining system in silty clay ground[J]. *Underground Space*, 2023, 13: 262-280.
- [8] LI C D, CHEN W Q, SONG Y J, et al. Optimal location of piles in stabilizing slopes based on a simplified double-row piles model[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(2): 377-389.
- [9] 李章杰, 周源海, 王宇栋, 等. 多级支护体系在深基坑中的应用 [J]. *建筑结构*, 2022, 52(S2): 2378-2383. (LI Z J, ZHOU Y H, WANG Y D, et al. Application of multi-level system in deep foundation pit[J]. *Building Structure*, 2022, 52(S2): 2378-2383. (in Chinese))
- [10] 田 野, 宋 志, 张松波, 等. 桩顶设置斜撑在深基坑多级支护中的应用 [J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(S1): 304-311. (TIAN Y, SONG Z, ZHANG S B, et al. Application of setting inclined support on pile top in multistage support of deep foundation pit[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(S1): 304-311. (in Chinese))
- [11] GUO C C, YE J T, ZHAO C Y, et al. Mechanical and deformation characteristics of composite assembled supporting structure[J]. *Geotechnical Research*, 2020, 7(4): 230-243.
- [12] 李 松, 马 郢, 郭 运, 等. 双排桩与单排桩组合多级支护结构在深大基坑中的应用 [J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(5): 103-109. (LI S, MA Y, GUO Y, et al. Application of multi-level retaining structure composed of double-row pile and single-row pile in deep and large foundation pit[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(5): 103-109. (in Chinese))
- [13] 翁其平, 王卫东. 多级梯次联合支护体系在上海虹桥综合交通枢纽基坑工程中的设计与实践 [J]. *建筑结构*, 2012, 42(5): 172-176. (WENG Q P, WANG W D. Design and construction of multi-level supporting system for deep foundation pits excavation of Shanghai Hongqiao Integrated Transport Hub[J]. *Building Structure*, 2012, 42(5): 172-176. (in Chinese))
- [14] 郑 刚, 聂东清, 程雪松, 等. 基坑分级支护的模型试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(5): 784-794. (ZHENG G, NIE D Q, CHENG X S, et al. Experimental study on multi-bench retaining foundation pit[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(5): 784-794. (in Chinese))
- [15] 郑 刚, 郭一斌, 聂东清, 等. 大面积基坑多级支护理论与工程应用实践 [J]. *岩土力学*, 2014, 35(S2): 290-298. (ZHENG G, GUO Y B, NIE D Q, et al. Theory of multi-bench retaining for large area foundation pit and its engineering application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S2): 290-298. (in Chinese))
- [16] 任望东, 张同兴, 张大明, 等. 深基坑多级支护破坏模式及稳定性参数分析 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(S2): 919-922. (REN D W, ZHANG T X, ZHANG D M, et al. Parametric analysis of failure modes and stability of multi-level retaining structure in deep excavations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(S2): 919-922. (in Chinese))
- [17] 郑 刚, 程雪松, 刁 钰. 无支撑多级支护结构稳定性与破坏机理分析 [J]. *天津大学学报 (自然科学与工程技术版)*, 2013, 46(4): 304-314. (ZHENG G, CHENG X S, DIAO Y. Analysis of the stability and collapse mechanism of non-prop and multi-stage retaining structure[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2013, 46(4): 304-314. (in Chinese))

收稿日期: 2025-08-12