DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.06.002 文章编号:1671-2579(2025)06-0010-07

斜直组合型双排锁扣钢管桩支护性能数值模拟分析

周毅[1,2],张宁[1*],王艳华[3],周德泉[1]

(1.长沙理工大学 土木与环境工程学院,湖南 长沙 410114;2.湖南建设投资集团有限责任公司,湖南 长沙 410004;3.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011)

摘要:为在香港国际机场地下通道基坑工程中选择合适的支护结构,该文提出斜直组合型锁扣钢管桩,该结构兼具支护、隔水与可回收利用的优点。基于有限元软件Midas GTS NX进行数值模拟,分析了不同组合形式与倾斜角对斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩工程响应的影响。结果表明:与传统双排竖直桩相比,斜直组合型双排桩可使内排桩顶部水平位移减少约50%,桩身弯矩峰值降低约30%,显著改善工程效果。在内排桩倾斜角相同的情况下,正-负斜双排桩的内排桩在控制顶部水平位移、减小桩身弯矩峰值和桩身挠度方面均优于其他组合形式。因此,在实际工程中,宜优先采用正-负斜双排桩或内斜-直双排桩,并在施工设备容许范围内尽量增大内排桩倾斜角,以减小桩顶部水平位移、桩身弯矩峰值和桩身挠度,确保基坑安全稳定。

关键词:基坑工程;锁扣钢管桩;数值模拟;双排桩;内排桩;桩顶水平位移;弯矩;土压力

中图分类号:U416 **文献标志码:**A

Numerical Simulation Analysis on Support Performance of Inclined-Vertical Combined Double-Row Interlocked Steel Pipe Piles

ZHOU Yi[1,2], ZHANG Ning[1*], WANG Yanhua[3], ZHOU Dequan[1]

(1. School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Construction Investment Group, Changsha, Hunan 410004, China; 3. China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China)

Abstract: To select appropriate support structures in foundation pit engineering of underground tunnels for the Hong Kong International Airport (HKIA), this paper proposed the use of inclined-vertical combined interlocked steel pipe piles, which are beneficial for support, water isolation, and recovery. Numerical simulations were conducted using finite element software Midas GTS NX to analyze the effect of different combination types and inclination angles on the engineering response of the inner-row piles of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles. The results show that the inclined-vertical combined double-row piles reduce the horizontal displacement at the top of the inner-row piles by approximately 50% and decrease the peak bending moment by around 30%, yielding better engineering performance than traditional vertical double-row piles. When the inclination angle of the inner-row piles is the same, the positive-negative inclined double-row piles outperform other combinations in controlling the horizontal displacement at the top and reducing the peak bending moment and the deflection of the piles. In engineering practice, it is recommended to prioritize positive-negative inclined double-row piles or inward-vertical inclined double-row piles, and to maximize the inclination angle within the allowable limits of construction equipment. This can lower the horizontal displacement at the top, peak bending moment, and deflection of the piles to ensure the stability of foundation pits.

Keywords: foundation pit; interlocked steel pipe pile; numerical simulation; double-row pile; inner-row pile; horizontal displacement of pile top; bending moment; earth pressure

收稿日期:2024-07-29 **修回日期:**2025-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52278329);湖南省交通运输厅科技项目(编号:202247)

作者简介:周毅,男,博士研究生,高级工程师.E-mail:45271750@qq.com

***通信作者:**张宁,男,博士研究生.E-mail:1229999474@qq.com

0　引言

香港国际机场位于中国香港特别行政区新界大屿山赤鱲角，场地以填筑土为主，地下水位较高。机场建设时，既要保障填筑土地基承载力及不均匀沉降满足要求，又要保证地下通道建设顺利进行，因此选择合适的挡土、隔水支护结构至关重要。

在香港国际机场的基坑建设过程中，由监测数据[1]可知：地下水位通常维持在海上水平面+1.5～+2.5 m范围。对于高水位基坑，其支护设计难度较大。这是因为地下水不仅影响土体的有效应力分布，还影响支护桩长期支护的稳定性。因此，设计支护结构时，需结合可靠的防水与支护措施，才能确保基坑的安全性和施工进度。

深基坑支护有喷锚支护、土钉支护、锚杆格构梁支护、桩锚支护、桩-内支撑支护[2]、地下连续墙支护[3]、桩-锚-撑组合支护[4]、倾斜单排桩支护[3]、斜-直交替支护[3]等方式。对于斜-直交替支护桩，郑刚等[5]发现随着排桩倾斜度增加，桩身最大水平位移和桩身最大弯矩均逐渐减小。斜-直交替支护桩形成一个三角形刚架支护体系，可提高整体稳定性和支护能力；周海祚等[6]、郑刚等[7]发现内斜-直双排桩和正负斜双排桩的支护能力强于外斜-直双排桩；郭景琢等[8]通过数值模拟与工程应用提出一种考虑桩土相互作用的平面杆系有限元倾斜桩设计计算方法；唐扬等[9]发现斜-直交替支护桩倾角越大，斜-直交替支护桩的变形越小，稳定性越好；斜桩越长，直桩的变形越小，最大正、负弯矩越小；刘畅等[10]通过工程实例和数值模拟发现，斜直交替桩由于桩顶倾角的存在，会产生斜撑效应，限制坑内土体的隆起，从而减小基坑的整体变形，提高支护结构的整体稳定性；王淞等[11]通过数值模拟及大型现场试验发现，倾斜桩组合支护基坑安全系数及临界破坏形态受超挖影响小于常规排桩支护。斜-直交替支护桩的支护能力、安全系数、抗隆起系数等均优于一般的竖直双排桩。

为了满足支护、隔水、回收需求，将钢管桩[12]与拉森钢板桩[13]通过锁扣相连，形成PC（Pipe-Combination）工法桩[14-15]。该桩既具有钢管桩良好的抗弯刚度，又具有拉森钢板桩良好的止水效果，且便于循环利用，在长沙暮坪湘江特大桥深水围堰[16]和深基坑工程[17]中广泛应用。

钢管桩的两侧焊接锁扣后，形成锁扣钢管桩，这种设计能够提高结构的抗弯刚度。若将锁扣钢管桩应用于结构中，则可增强斜直组合型双排桩的抗弯刚度。

目前国内外学者较少对斜直组合型锁扣钢管桩支护结构处于地下高水位或软弱填筑土场地条件下，不同组合形式的力学响应及其工程性能进行研究[18-19]。因此，在类似复杂地质条件下，关于不同支护组合形式的实际效果、力学响应及其对基坑稳定性的影响，尚未得到充分研究与验证。

基于此，本文采用Midas GTS NX研究竖直双排桩[20]、外斜-直双排桩、内斜-直双排桩、正-负斜双排桩等斜直组合型双排锁扣钢管桩在基坑开挖过程中的支护性能差异，比较倾斜角变化时内排桩的位移、弯矩、挠度等变化规律，为香港国际机场等地下水位高的填筑土场地地下通道或深基坑开挖支护设计提供依据。

1　数值模拟设计

本文使用Midas GTS NX有限元软件模拟深基坑支护及开挖过程。基坑深度为8 m，竖直支护桩长为14 m。有限元模型长度不低于3倍开挖深度，土体深度不低于2倍开挖深度。具体步骤为：首先，在土体中设置不同的支护桩组合体；随后，依次进行4次基坑开挖，每次开挖2 m，直至基坑底部（8 m）。

支护桩选取锁扣钢管桩，如图1所示。材料均选用Q345材质，弹性模量E=206 GPa，泊松比为0.3。土层参数见表1，截面参数见表2。斜直组合型双排锁扣钢管桩有限元模型，如图2所示。

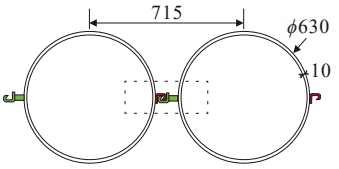


图1　锁扣钢管桩截面（单位：mm）

Figure 1　Section of interlocked steel pipe pile (unit: mm)

表1　土层参数

Table 1　Parameters of soil layer

名称	厚度/m	γ_{unsat}/(kN·m^{-3})	γ_{sat}/(kN·m^{-3})	E_s/kPa	φ/(°)	孔隙率/%
杂填土	2	16	20	2.2×10^4	8.0	50
黏土	4	16	17	7.3×10^3	25.0	40
砂土	6	17	20	4.3×10^4	36.0	38
粉砂	4	18	21	2.3×10^4	32.1	34
碎石土	14	20	22	4.7×10^4	36.0	30

注：E_s为土层弹性模量；φ为内摩擦角；γ_{unsat}为未饱和土的重度；γ_{sat}为饱和土的重度。

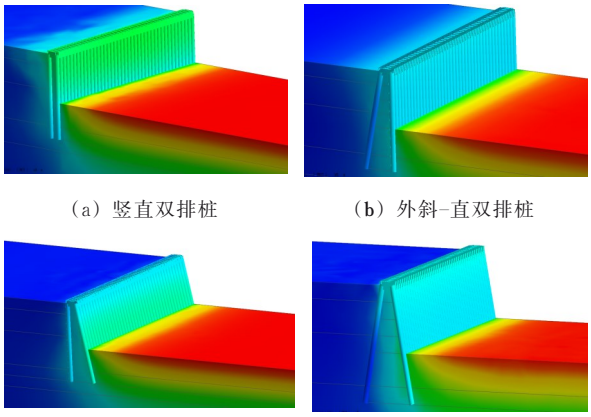
表2 锁扣钢管桩组合体截面参数

Table 2 Parameters of sections of interlocked steel pipe combinations

截面类型	I_z/m^4	A/m^2
钢管锁扣桩	9.105×10^{-3}	7.66×10^{-2}
冠梁	1.190×10^{-2}	8.25×10^{-2}
连梁	1.550×10^{-2}	9.75×10^{-2}

注：I_z为截面惯性矩；A为截面面积。

所有土层均采用15节点单元建模，有限元模型和网格生成如图2所示。该模型的平均单元长度为1 m，单元总数为25 980个。支护结构采用梁单元进行模拟，地表为自由边界条件，模型侧面限制其水平方向位移，底部为固定边界条件。假设土为满足莫尔-库仑屈服准则的理想弹塑性材料。



（a）竖直双排桩 （b）外斜-直双排桩

（c）内斜-直双排桩 （d）正-负斜双排桩

图2 斜直组合型双排锁扣钢管桩有限元模型

Figure 2 Finite element model of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles

2 模拟结果与分析

2.1 内排桩顶部水平位移随倾斜角和开挖深度变化

内排桩顶部水平位移随倾斜角和开挖深度变化情况如图3所示。

从图3可以看出：

（1）开挖深度相同时，竖直双排锁扣钢管桩内排桩的桩顶位移最大，随后依次为5°外斜-直双排桩、5°内斜-直双排桩、10°外斜-直双排桩、10°内斜-直双排桩、15°外斜-直双排桩、15°内斜-直双排桩、5°正-负斜双排桩、10°正-负斜双排桩、15°正-负斜双排桩。15°正-负斜双排锁扣钢管桩内排桩的桩顶位移最小。这表明基坑开挖过程中，斜桩倾斜角相同时，正-负斜双排桩的内排桩顶部水平位移最小，工程效果最好。其次是内斜-直双排桩、外斜-直双排桩，竖直双排桩工程效果最差。

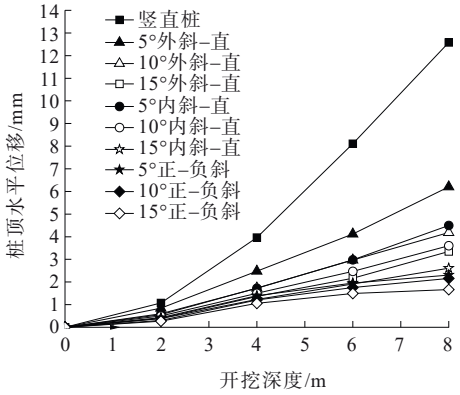


图3 斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩的桩顶位移-开挖深度变化曲线

Figure 3 Curve between displacement at top of inner-row piles of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles and excavation depth

（2）各斜直组合桩的内排桩桩顶位移随倾斜角增大而减小。工程中，可将双排桩优先设置成正-负斜双排桩、内斜-直双排桩、外斜-直双排桩，在施工设备容许范围内尽量增大倾斜角。

（3）内排桩顶部水平位移随倾斜角和开挖深度变化规律与郑刚等[7]的模型试验结果类似。

2.2 内排桩桩身弯矩随倾斜角和开挖深度变化

2.2.1 相同开挖深度下的桩身弯矩（H=6 m）

开挖深度6 m时斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩弯矩随倾斜角的变化规律见图4。

由图4可知：

（1）各斜直组合桩的内排桩桩身弯矩峰值均随倾斜角增大而减小。这与内排桩桩顶位移的变化规律类似。

（2）竖直双排桩的内排桩桩身弯矩峰值较大。斜桩倾斜角相同时，外斜-直组合的内排桩桩身弯矩最大，其次是正-负斜组合和内斜-直组合。

2.2.2 桩身弯矩随开挖深度变化

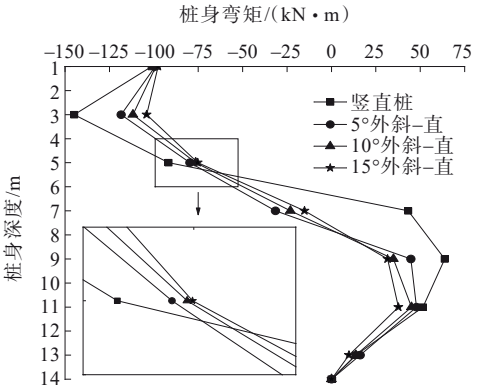
斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩弯矩随开挖深度变化规律见图5。

由图5可知：

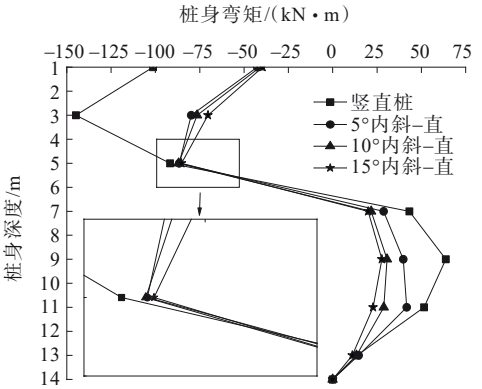
（1）斜直组合型双排桩内排桩弯矩峰值随开挖深度加大而增大，弯矩曲线均出现反弯点，反弯点随着开挖深度的增加而下移。

（2）开挖深度加大过程中，外斜-直组合的内排

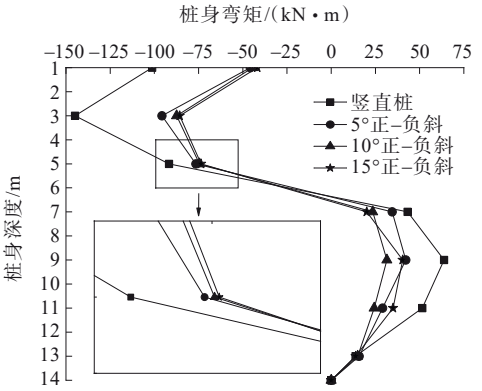
桩桩身弯矩最大,其次是正-负斜组合和内斜-直组合。



(a) 外斜-直双排桩



(b) 内斜-直双排桩



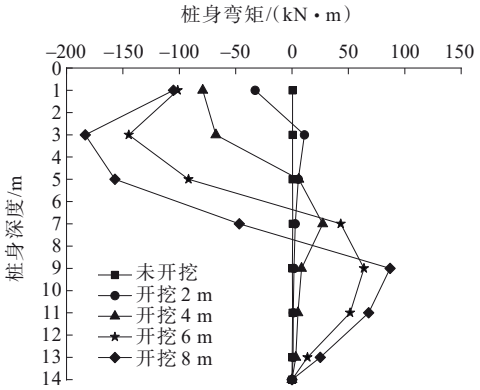
(c) 正-负斜双排桩

图4　斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩弯矩随倾斜角变化规律(H=6 m)

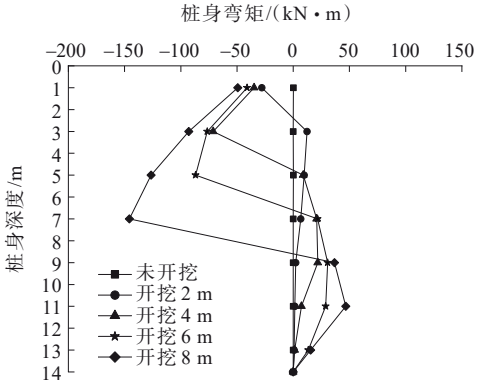
Figure 4　Variation patterns of bending moment of inner-row piles of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles with inclination angle (H=6 m)

2.3　内排桩、外排桩桩身土压力随倾斜角变化

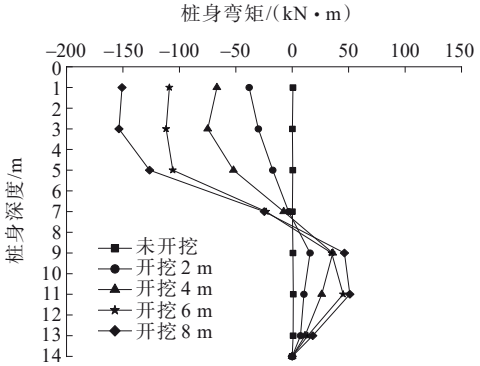
斜直组合型双排锁扣钢管桩整体上相当于重力式挡土墙,土压力分布示意图见图6。



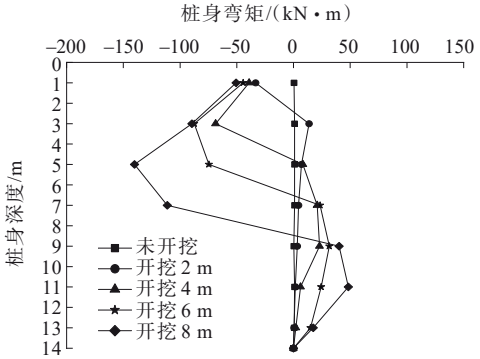
(a) 竖直双排桩



(b) 10°外斜-直双排桩



(c) 10°内斜-直双排桩



(d) 10°正-负斜双排桩

图5　斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩弯矩随开挖深度变化规律

Figure 5　Variation patterns of bending moment of inner-row piles of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles with excavation depth

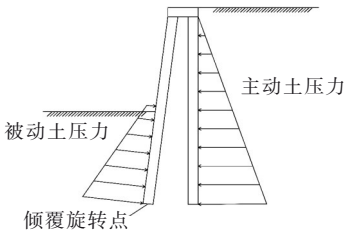


图6 支护结构受力图

Figure 6 Stress of support structures

开挖深度8 m时斜直组合型双排锁扣钢管桩土压力分布见图7。

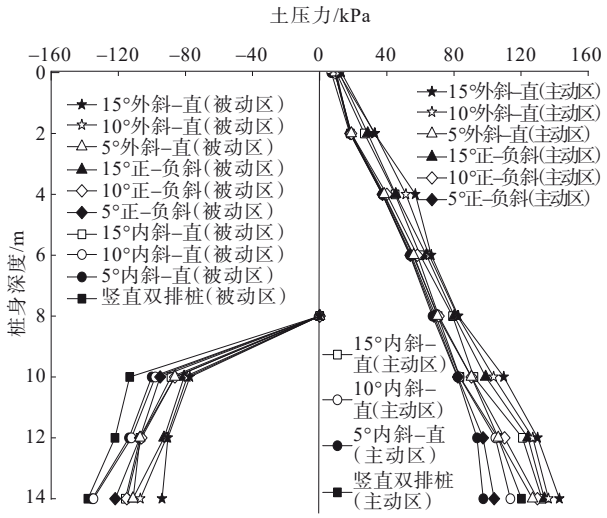


图7 开挖深度8 m时斜直组合型双排锁扣钢管桩土压力分布

Figure 7 Earth pressure distribution of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles at excavation depth of 8 m

由图7可知：

(1) 对于主动区，同型组合的主动土压力随倾斜角增大而增大。15°外斜-直组合的主动区土压力最大；5°内斜-直组合体的主动区土压力最小。主动区土压力大对基坑安全不利。

(2) 竖直双排桩的被动区土压力最大。被动区土压力大对基坑安全不利。

(3) 试验结果与前人模型试验结果规律一致[7,21]。

2.4 内排桩桩身挠度随倾斜角变化规律

开挖深度8 m时斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩桩身挠度随倾斜角变化规律见图8。

由图8可知：

(1) 竖直双排桩的内排桩桩身挠度峰值较大。当斜桩倾斜角相同时，外斜-直组合的内排桩桩身弯矩最大，其次是正-负斜组合，内斜-直组合最小。

(2) 基坑支护组合的内排桩为直桩时，其挠度更大，表明设计在深基坑中可能更容易发生较大变形。而内排桩为斜桩时，与外排桩组合成三角形，挠度较小，明显更稳定，说明这种深基坑支护中内斜直组合与正负斜组合的工程响应优于外斜直组合与竖直双排桩。

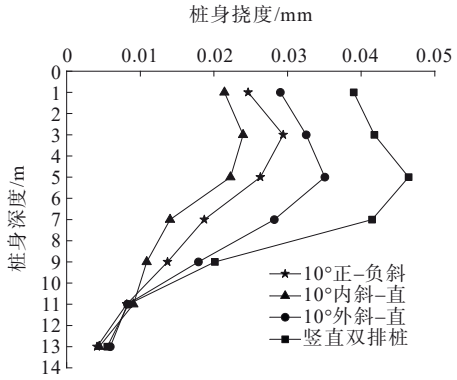


图8 斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩桩身挠度随倾斜角变化规律(H=8 m)

Figure 8 Variation patterns of deflection of inner-row piles of inclined-vertical combined double-row interlocked steel pipe piles with inclination angle (H=8 m)

3 结论

斜直双排锁扣钢管桩作为一种新型的支护方式，兼具支护、隔水和可回收等优势，有望替代传统内支撑体系，在施工过程中具有开挖便捷、固体废物少等特点。本文采用数值模拟方法，系统研究了斜直组合型双排锁扣钢管桩内排桩的工程响应，得出以下主要结论：

(1) 随着基坑开挖深度增加，各类斜-直组合桩的内排桩桩顶位移均逐渐增大，其中竖直双排锁扣钢管桩的桩顶位移增长速率最大。斜-直组合型双排桩在工程中整体表现优于传统双排竖直桩。在斜桩倾斜角相同的条件下，正-负斜双排桩的内排桩顶部水平位移最小，工程效果最佳，其次为内斜-直双排桩和外斜-直双排桩，竖直双排桩的工程效果最差。

(2) 随着倾斜角增大，各斜直组合桩的内排桩桩身弯矩峰值均呈下降趋势。正-负斜双排桩的桩身弯矩峰值最小，内斜-直双排桩次之，外斜-直双排桩较大，而竖直双排桩的桩身弯矩峰值最大。

(3) 在不同组合形式的双排锁扣钢管桩中，15°外斜-直组合的主动区土压力最大；5°内斜-直组合体

的主动区土压力最小、竖直双排桩的被动区土压力最大。主动区土压力大不利于基坑稳定。

(4)不同组合下的内斜-直组合、正-负斜组合的桩身挠度均小于外斜-直组合与传统双排锁扣钢管桩。当内排桩为斜桩时,结构整体变形小、稳定性更高,工程性能优于内排桩为直桩的支护形式。

(5)在实际工程中,可优先采用正-负斜双排桩或内斜-直双排桩,并在施工设备容许范围内尽量增大倾斜角,以有效控制内排桩顶部水平位移和桩身弯矩峰值。研究结果可为香港机场等高水位填筑土场地中的地下通道或深基坑开挖支护设计提供依据。

参考文献:

References:

[1] WANG F, JIAO J, LEE J, et al. Preliminary numerical study on groundwater system at the Hong Kong International Airport[J]. Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management, Two Volume Set, 2004: 2047-2052.

[2] 田沛恒. 某深基坑内支撑支护体系施工动态数值模拟及参数分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
TIAN Peiheng. Dynamic construction numerical simulation and parameter analysis of deep foundation pit internal bracing system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[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 Shaoming, WEI Shifeng, TAN Yong, et al. Field performance of large-scale deep excavations in Suzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (3): 458-469.

[4] 闫楠, 郝增明, 白晓宇, 等. 深基坑双排微型桩–锚–撑组合支护结构受力与变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(6): 2295-2309.
YAN Nan, HAO Zengming, BAI Xiaoyu, et al. Force and deformation characteristics of double-row miniature pile-anchor-support combination support structure for deep foundation pit[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(6): 2295-2309.

[5] 郑刚, 何晓佩, 周海祚, 等. 基坑斜–直交替支护桩工作机理分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 97-100.
ZHENG Gang, HE Xiaopei, ZHOU Haizuo, et al. Working mechanism of inclined-vertical retaining piles in excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(sup 1): 97-100.

[6] 周海祚, 郑刚, 何晓佩, 等. 基坑倾斜桩支护稳定特性及分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 271-277.
ZHOU Haizuo, ZHENG Gang, HE Xiaopei, et al. Stability characteristics and analysis method for inclined retaining walls in excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 271-277.

[7] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 基坑倾斜桩支护性能及机理大型模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1581-1591.
ZHENG Gang, WANG Yuping, CHENG Xuesong, et al. Large-scale model tests on performance and mechanism of inclined retaining structures of excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1581-1591.

[8] 郭景琢, 李昕昊, 程雪松, 等. 基坑斜直组合倾斜桩支护结构设计计算方法研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 153-163.
GUO Jingzhuo, LI Xinhao, CHENG Xuesong, et al. Study on design and calculation method for vertical and inward-inclined pile retaining structure of excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(8): 153-163.

[9] 唐扬, 张慎, 侯慧珍, 等. 基坑斜直交替支护桩力学性能及影响因素研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19(增刊2): 778-784, 803.
TANG Yang, ZHANG Shen, HOU Huizhen, et al. Study on the mechanism and influencing factors of inclined and vertical piles in foundation pits[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(sup 2): 778-784,803.

[10] 刘畅, 马力遥, 郑刚, 等. 斜直交替基坑支护桩现场实测及机理研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(5): 827-835.
LIU Chang, MA Liyao, ZHENG Gang, et al. Field measurement and mechanism of inclined and vertical piles in foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(5): 827-835.

[11] 王淞, 刘永超, 张建新, 等. 深厚软土地区倾斜桩组合支护基坑稳定性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20 (2): 556-565, 576.
WANG Song, LIU Yongchao, ZHANG Jianxin, et al. Research on stability of foundation pit with inclined pile combination support in deep soft soil area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20 (2): 556-565, 576.

[12] 闫宇, 张广超, 孙博文, 等. 波浪荷载作用下海上钢管桩承载特性及影响因素分析[J/OL]. 中外公路, 1-7[2023-07-24]. https://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1363. U. 20230724.1430.004.html.
YAN Yu, ZHANG Guangchao, SUN Bowen, et al. Analysis of bearing characteristics and influencing factors of offshore steel pipe piles under wave load[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-7[2023-07-24]. https://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1363. U. 20230724. 1430.004.html.

[13] 杨琴, 方忠强, 刘毅, 等. 不同工况下双排钢板桩围堰内力变形研究[J]. 中外公路, 2023, 43(4): 158-164.
YANG Qin, FANG Zhongqiang, LIU Yi, et al. Analysis of internal force and deformation of double-row steel sheet pile cofferdam in different working conditions[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(4): 158-164.

[14] 金小荣, 陈树龙, 吴国彬, 等. 一种新型绿色围护工艺: PC工法桩[J]. 地基处理, 2019, 1(3): 87-90.
JIN Xiaorong, CHEN Shulong, WU Guobin, et al. PC pile: An innovative recycle pit support technology[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(3): 87-90.

[15] 陈翔逸, 王艳华, 周德泉, 等. PC工法桩刚度折减效应数值模拟分析[J/OL]. 中外公路, 1-8[2024-04-22]. https://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1363. U. 20240422.1347.005. html.
CHEN Xiangyi, WANG Yanhua, ZHOU Dequan, et al. Numerical simulation analysis of stiffness reduction effect of PC pile construction method[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-8[2024-04-22]. https://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1363.U.20240422.1347.005.html.

[16] 杨金龙, 曾华新, 韩珂. 深水浅覆盖地层桥墩基础PLC工法桩围堰施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(9): 75-79.
YANG Jinlong, ZENG Huaxin, HAN Ke. Construction technology of cofferdam with PLC piles for bridge pier foundation in deep water and shallow overburden stratum [J]. Construction Technology, 2022, 51(9): 75-79.

[17] 韦实, 梁荣柱, 李忠超, 等. 基于3D打印的PC工法桩基坑围护结构变形特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊2): 4320-4332.
WEI Shi, LIANG Rongzhu, LI Zhongchao, et al. Experimental investigation on the deformation characteristics of PC piles retaining structure based on the 3D printing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(sup 2): 4320-4332.

[18] 周德泉, 王创业, 周毅, 等. 被动倾斜桩应用研究与展望[J]. 中外公路, 2023, 43(2): 1-10.
ZHOU Dequan, WANG Chuangye, ZHOU Yi, et al. Application research and prospect of passive battered pile [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(2): 1-10.

[19] 钟翰虎, 李聪, 李雨林, 等. 偏压荷载下深基坑支护结构非对称变形与控制技术研究[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 34-37.
ZHONG Hanhu, LI Cong, LI Yulin, et al. Research on asymmetric deformation and control technology of supporting structure of deep foundation pit under eccentric load[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 34-37.

[20] 崔宏环, 张立群, 赵国景. 深基坑开挖中双排桩支护的三维有限元模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 662-666.
CUI Honghuan, ZHANG Liqun, ZHAO Guojing. Numerical simulation of deep foundation pit excavation with double-row piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(4): 662-666.

[21] 聂庆科, 胡建敏, 吴刚. 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3089-3094.
NIE Qingke, HU Jianmin, WU Gang. Deformation and earth pressure of a double-row piles retaining structure for deep excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (11): 3089-3094.