

中文引用格式:曹卫平,肖涵楠,罗龙平,等. 双排斜直桩基坑支护工作机制及稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 60-69.

英文引用格式:CAO Weiping, XIAO Hannan, LUO Longping, et al. On bracing mechanism and stability of two-row inclined-vertical retaining piles [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 60-69.

双排斜直桩基坑支护工作机制及稳定性分析^{*}

曹卫平¹教授, 肖涵楠^{**1}, 罗龙平¹, 吕品¹, 赵敏²教授

(1 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021)

中图分类号:X948; TU473

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1145

资助项目:陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-299)。

【摘要】 为提高双排斜直桩组合支护在黄土基坑中的应用,通过模型试验研究黄土基坑中前斜后直双排桩和双排内斜桩支护结构在开挖过程中的位移、内力及土压力变化,并通过数值分析探讨斜桩倾角对支护效果的影响。结果表明:双排内斜桩支护的桩身水平位移和坑外地表沉降均小于前斜后直桩支护,其前排桩的最大轴力、弯矩和净土压力也较低。随着斜桩倾角增大,桩顶位移、坑外地表沉降及桩身最大轴力减少,而桩身最大弯矩和基坑安全性系数增加。在双排斜直桩支护结构中,前排斜桩负责内撑、支挡土体及提高结构安全性和稳定性,后排桩则承担拉锚、传递及分散土压力的作用,两者协同提升支护结构的整体稳定性。基坑开挖过程中,坑外土体应力路径先远离后靠近破坏 K_f 线,斜桩倾角越大,土体应力路径越远离 K_f 线;相比之下,双排内斜桩支护的土体应力路径更远离主应力 K_1 线,基坑的安全性和稳定性更高。

【关键词】 双排斜直桩; 前斜后直双排桩; 支护性能; 稳定性; 模型试验; 数值模拟

On bracing mechanism and stability of two-row inclined-vertical retaining piles

CAO Weiping¹, XIAO Hannan¹, LUO Longping¹, LYU Pin¹, ZHAO Ming²

(1 School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an Shaanxi 710021, China)

Abstract: In order to enhance the application of double-row inclined-vertical pile composite support in loess foundation pits, model tests were conducted to investigate the displacement, internal force, and earth pressure changes of forward-inclined rear-vertical double-row piles and double-row inward-inclined pile support structures during excavation. Numerical analysis was also used to explore the effect of pile inclination on support performance. The results show that the horizontal displacement of the pile body and surface settlement outside the pit are both smaller in the inward-inclined double-row pile support compared to the forward-inclined rear-vertical pile support. Additionally, the maximum axial force, bending

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0060-10; 收稿日期:2025-02-15; 修稿日期:2025-04-18

** 通信作者:肖涵楠(1999—),男,四川成都人,硕士研究生,主要研究方向为基坑工程。E-mail: xiaohannan@xauat.edu.cn。

moment, and net earth pressure on the front row piles are also lower. As the pile inclination increases, the pile top displacement, surface settlement outside the pit, and the maximum axial force of the pile body decrease, while the maximum bending moment and the safety factor of the foundation pit increase. In the double-row inclined-vertical pile support structure, the front inclined piles function to brace internally, retain the soil, and enhance structural safety and stability, whereas the rear vertical piles serve to anchor, transfer, and distribute earth pressure. Together, they improve the overall stability of the support system. During excavation, the stress path of the soil outside the pit initially moves away from and then approaches the failure K_f line. A greater pile inclination results in the stress path staying further from the K_f line. Comparatively, the stress path of the inward-inclined double-row pile support stays further from the principal stress K_f line, leading to higher safety and stability of the foundation pit.

Keywords: double-row inclined-vertical piles; forward-inclined rear-vertical double-row piles; support performance; stability; model test; numerical simulation

0 引言

当前,随着地下结构日益增多,基坑工程环境日趋复杂^[1],紧邻施工情况愈发普遍^[2],无支撑支护结构备受关注^[3]。较于传统无支撑支护中的双排直桩,双排斜直桩组合支护结构在极限挖深、抗侧移刚度方面更具优势,整体稳定性与安全性也显著提升。

目前,已有学者对双排斜直桩组合支护结构性状进行了一些研究。周德泉等^[4-6]开展室内模型试验,分析了斜-直组合倾斜双排桩在倾斜软基上的受力变形模式及破坏机制。徐源等^[7]开展室内模型试验,分析了不同因素对前排桩倾斜的双排桩工作性状的影响。叶金铨等^[8]通过模型试验发现,双排斜桩在开挖和堆载过程中位移增长缓慢、桩身弯矩较小,相比其他桩型有一定优势。田野等^[9-10]通过数值分析及现场实测发现,倾斜双排桩相较传统垂直双排桩支护性能更好,且整体稳定性安全系数更高。JIANG Yuenan 等^[11]通过数值模拟发现,前后排倾斜桩工作特性有别,支承效果受倾斜角度与方向影响,前排倾斜、后排竖直的双排桩抗倾覆稳定性更佳。YE Jinbi 等^[12]通过室内模型试验和数值模拟发现,在开挖和分级加载过程中,双排斜桩相较于传统双排垂直桩和前排为斜桩的双排桩支护性能更好且最佳倾角为 $8 \sim 16^\circ$ 。阮从威等^[13]通过数值模拟和现场实测发现,前斜后直双排桩支护体系在深基坑工程中效果明显。WU Yibin 等^[14]利用 FLAC^{3D} 软件分析了双排倾斜桩支护深基坑开挖全过程,结果表明:斜桩的倾斜度为 $10 \sim 15^\circ$ 时,斜桩利用率较高,支护效果较好。田野等^[15]在武汉长江阶地某深度 12 m 基坑工程中采用无支撑斜桩支护,结

果表明:通过调整桩身倾角可有效调整土压力,减少支护结构变形。郑刚等^[16]在天津软土地区某深度 10 m 基坑工程中采用前排斜桩与后排直桩组合支护结构,开展现场试验,发现斜直双排桩的协同作用能有效减小桩身位移及坑外土体沉降。

综上,双排斜直桩作为一种新型的基坑支护结构,在工程中已经有了一定的应用,但对其工作机制的研究较少。鉴于此,笔者拟通过模型试验和数值模拟,分析斜桩倾角对双排斜直桩组合支护结构变形、内力及坑外地表沉降的影响,揭示双排斜直桩组合支护工作机制,以期对双排斜直桩组合支护在黄土基坑中的应用提供理论支撑。

1 基坑开挖模型试验

1.1 基坑开挖概况

模型试验几何相似比为 1:20,基坑开挖在 $1.22 \text{ m} \times 0.77 \text{ m} \times 0.97 \text{ m}$ (长×宽×高)的模型槽内进行,用挡板将模型槽从中间一分为二,如图 1 所示。前斜后直双排桩、双排内斜桩支护结构总用桩量均为 4 根,斜桩倾角为 15° 。桩间距为 100 mm,选用靠挡板处直桩和斜桩各 1 根监测应变。为尽量减小边界效应对基坑开挖的影响,选用模型槽短边进行开挖,基坑开挖尺寸均为 $400 \text{ mm} \times 385 \text{ mm}$ 。在冠梁中部设置 1 个百分表监测桩顶水平位移,坑外地表各布设 5 个百分表($S_1 \sim S_{10}$)监测地表沉降。双排内斜桩支护结构起始点 S_1 位于冠梁中部,向外依次布设 S_2 、 S_3 、 S_4 和 S_5 ,其距 S_1 的距离分别为 80、200、400、600 mm。前斜后直双排桩支护结构起始点 S_6 位于冠梁中部,向外依次布设 S_7 、 S_8 、 S_9 、 S_{10} ,其距 S_6 的距离同样为 80、200、400、600 mm。

基坑开挖过程分为 2 个阶段,第 1 阶段分 4 步

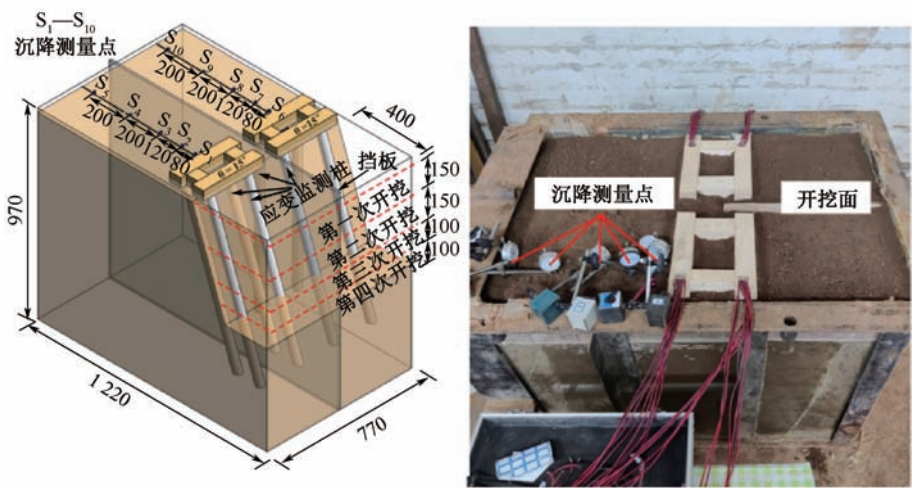


图1 模型试验

Fig.1 Model test diagram

开挖至坑底,第1—4步开挖深度分别为150、150、100、100 mm。为得到前斜后直双排桩和双排内斜桩支护桩结构的极限开挖深度,第2阶段从坑底(500 mm处)每次开挖50 mm,若桩顶水平位移发生激增,立即停止开挖。

1.2 模型桩及地基土

支护桩选用外径40 mm、壁厚2 mm的硬质PVC管制作,桩总长850 mm,桩顶插入冠梁50 mm,有效桩长800 mm。将PVC管剖成两半,在每个管片内侧自上而下布置7个应变片。第一个应变片距桩顶50 mm,之后每隔140 mm布置1个应变片。通过简支梁四分法计算PVC管材的弹性模量 $E_p = 3.13 \text{ GPa}$ 。

选择木材作为冠梁制作材料方便钻孔,根据规范规定冠梁的宽度不宜小于桩径,冠梁高度不宜小于桩径的0.6倍,根据所选模型桩的尺寸,将支护结构冠梁的尺寸设置为320 mm×180 mm×50 mm。

试验用黄土取自于陕西省蓝田县某黄土地场,其颜色呈黄褐色,夹杂细小砂石,天然含水率约为18.9%,密度在1.6~1.7 g/cm³。其基本物理力学参数见表1,其中,重塑黄土的压缩模量 $E_s = 4.27 \text{ MPa}$ 。为保证填土均匀,采用落雨法分层铺填。先在模型槽底填筑150 mm厚的黄土,再放入支护结构,并在排桩后设置桩间挡土布防止桩间距过大引起土体渗漏,随后开始沿支护结构内外分层填筑黄土,每层填筑高度200 mm,填土高度共950 mm。每层黄土填筑完成后整平,并用抹光机振动压密使填土密度与原状土接近。所有土体全部填筑完毕后,静置24 h确保土体自重变形稳定。

表1 黄土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of loess

土名	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率 $w / \%$	液限 $w_L / \%$	塑限 $w_p / \%$	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
原状黄土	1.67	17.8	32.9	22.8	31.3	23.7
重塑黄土	1.68	17.8	31.3	21.9	29.6	20.3

2 基坑开挖模型试验结果及分析

2.1 桩身水平位移

将桩视为弹性地基梁,通过桩身各截面纵向应变差得到桩身弯矩,拟合弯矩函数通过下式可求得桩身水平位移:

$$EI\omega = - \int \left[\int M(x) dx \right] dx + C_1x + C_2 \quad (1)$$

式中: E 为桩身材料的弹性模量,Pa; I 为桩身截面的惯性矩,m⁴; ω 为桩身位移,m; $M(x)$ 为拟合桩身弯矩函数,N·m; C_1 、 C_2 为积分常数,可通过桩顶位移边界条件确定。

桩身水平位移如图2所示,其中,支护桩向坑内位移为正。从图2可以看出,随着基坑开挖,前斜后直双排桩与双排内斜桩支护结构桩身水平位移不断增大,2种支护结构的桩身水平位移变形模式均呈内凸式。前排桩桩身水平位移明显大于后排桩,原因是双排桩之间存在桩间土,在荷载的作用下,支护结构整体向坑内位移,后排桩受到桩间土的抗力而前排桩承受推力,使得前排桩桩后土压力较后排桩更大,承担主要荷载。

对于相同的基坑开挖深度,双排内斜桩支护结构的桩身水平位移明显小于前斜后直双排桩。开挖

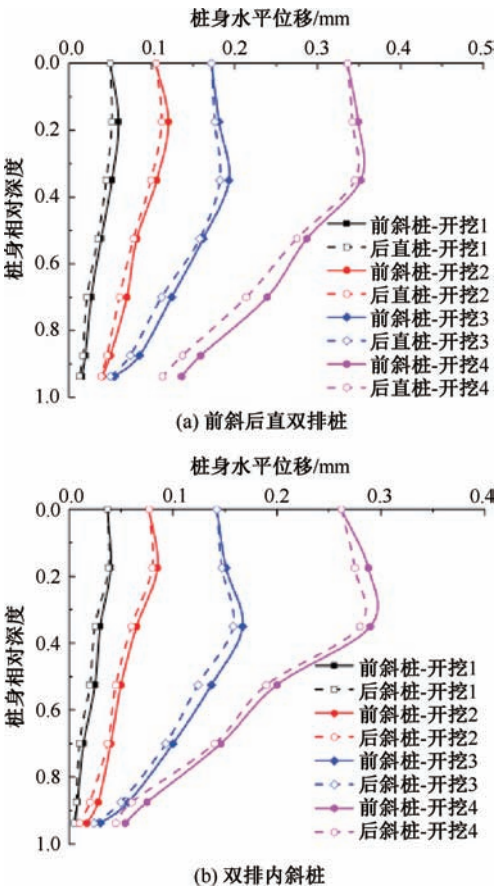


图 2 桩身水平位移随开挖深度的变化
Fig. 2 Pile horizontal displacements with excavation

完成时,双排内斜桩的前排斜桩桩身最大水平位移为 0.29 mm,相较于前斜后直双排桩的 0.35 mm,减小 17.14%。这说明双排内斜桩比前斜后直双排桩的内撑效应更强,位移控制效果更好,基坑安全性及稳定性更高,更适用于挖深较大的基坑工程。

2.2 坑外地表沉降

坑外地表沉降如图 3 所示。随着开挖不断加深,前斜后直双排桩与双排内斜桩支护结构坑外地表沉降逐渐增大,分布模式均为凹槽型。开挖第 4 步完成时,双排内斜桩支护结构坑外地表沉降最大值明显小于前斜后直双排桩,其影响范围更小,这是由于双排内斜桩支护结构的后排桩为倾斜桩,改变了土体应力路径,减小了土体水平方向的位移,从而降低坑外土体的沉降。基坑开挖完成后,双排内斜桩坑外地表沉降最大值为 0.30 mm,相较于前斜后直双排桩的 0.33 mm 减小 9.09%。这说明双排内斜桩支护结构对坑外地表沉降控制效果优于前斜后直双排桩,更适用于基坑周围环境复杂的工程。

2.3 桩身弯矩

支护结构桩身弯矩随开挖深度的变化如图 4

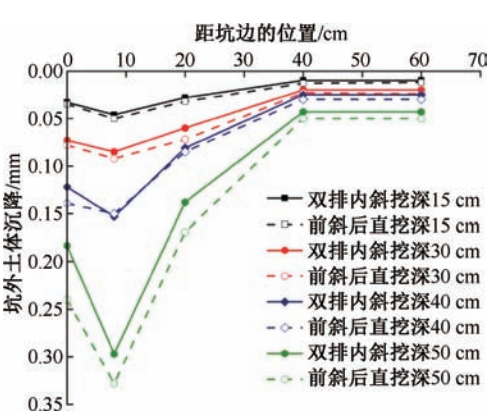


图 3 坑外地表沉降随开挖深度的变化
Fig. 3 Soil surface settlements outside the pit with excavation

所示,其中,桩身基坑内侧受拉为正。2 种支护结构的前、后排桩桩身弯矩均随着挖深而增大,反弯点下移,但弯矩分布模式不同。前排桩桩身弯矩最大值不在桩顶,而后排桩桩顶弯矩最大,前、后排桩桩身上部基坑内侧受拉,随深度桩身弯矩逐渐减小,再反弯增大到最大负弯矩而后减小趋于零。这是由于连梁将前后排桩连接而成一个空间刚架结构,限制了前后排桩的侧移与转动,由于冠梁与前后排桩顶为刚性连接,使得彼此相互约束,因此,桩顶产生弯矩,且后排桩受到连梁传递的拉力,同时还受到土压力,使得后排桩的桩顶弯矩较大。2 种支护结构的前、后排桩桩身最大弯矩均为前排桩大于后排桩。

开挖第 4 步完成后,双排内斜桩支护结构的前、后排斜桩桩身弯矩均小于前斜后直双排桩,双排内斜桩的前排桩桩身最大弯矩为 0.82 N · m,相较于前斜后直双排桩支护结构的 0.97 N · m 减小 15.46%。这说明双排内斜桩支护结构的自撑效应优于前斜后直双排桩,其控制变形能力和整体安全性更高,整体支护效果更好。

2.4 桩身轴力

桩身轴力 N 可通过下式计算:

$$N = EA_i \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} \quad (2)$$

式中: A_i 为桩身第 i 横截面面积, m^2 ; ε_1 、 ε_2 分别为桩身内、外两侧纵向应变。

2 种支护结构桩身轴力随开挖深度的变化如图 5 所示,其中,支护桩轴力受压为正。前斜后直双排桩与双排内斜桩支护结构的前、后排斜桩桩身轴力都为正值,说明桩身受力均为压力。前排桩主要起到支挡土体的作用,在土压力的作用下,前排桩的

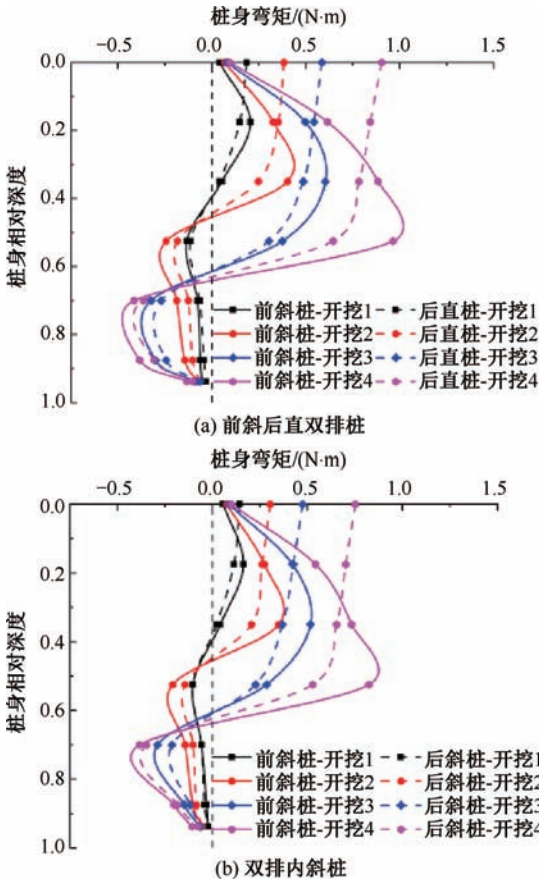


图4 桩身弯矩随开挖深度的变化曲线
Fig. 4 Curve of pile bending moment with excavation depth

桩身受压;后排桩起到支挡及传递和分散土压力的作用,并通过连梁与前排桩形成空间超静定结构体系,共同形成抵抗土压力作用的反向力偶,后排桩承受土压力等外部荷载的同时,后排桩的桩顶冠梁也会对桩身产生一定的压力,使得后排桩桩身也受压。2种支护结构的轴力变化曲线趋势都是从桩顶向下增大,到达开挖面附近时轴力开始减小,到桩底附近后逐渐接近于零。随着开挖深度的增大,桩身轴力也在增大,最大轴力值一般在开挖面附近。这是由于以支护桩轴力最大值位置为分界线,在轴力最大值以上,支护桩发生相对于桩侧土体向上的位移,支护桩受到负摩阻力;而在轴力最大值位置以下,支护桩发生相对于桩侧土体向下的位移,支护桩受到正摩阻力,抵消部分轴力,从而桩身轴力到桩底附近后逐渐趋于零。

开挖过程中,双排内斜桩支护结构的前、后排斜桩桩身轴力均小于前斜后直双排桩。在开挖第4步完成后,双排内斜桩的前排斜桩桩身最大轴力为140 N,相较于前斜后直双排桩的147 N减小

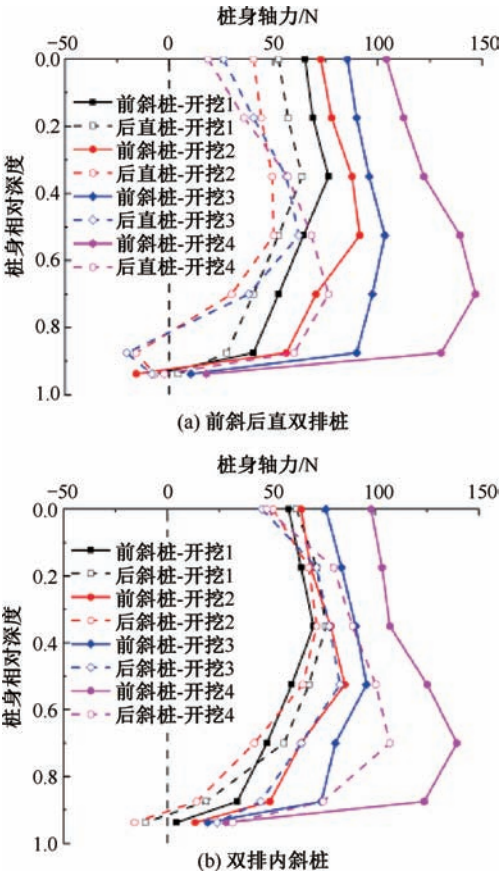


图5 桩身轴力随开挖深度的变化曲线
Fig. 5 Curve of pile axial force with excavation depth

4.76%。其原因是双排内斜桩支护桩身水平位移相比前斜后直双排桩要小,从而桩土之间摩擦力相对较小。这说明双排内斜桩支护结构的内撑效应强于前斜后直双排桩,其控制水平变形能力更强。

2.5 桩身净土压力

对桩身弯矩拟合函数 $M(x)$ 二次微分可得到桩身净土压力 $p(x)$,如图6所示。随着开挖深度不断加深,支护桩受到桩身净土压力也逐渐增大,土压力零点也在不断下移,其中,前排桩的净土压力明显大于后排桩,说明前排桩主要承担土压力。开挖第4步完成后,双排内斜桩支护结构前、后排桩主动区净土压力绝对值分别为118、87 Pa,前排桩主动区净土压力相比后排桩增大35.63%。其原因是前斜后直双排桩与双排内斜桩支护结构随着开挖进行,桩前土逐渐减少,支护结构整体向坑内位移,由于支护结构中间存在桩间土,桩间土可给后排桩一定的支撑力,而对前排桩上有一定的推力,使得前排桩桩侧土压力大于后排桩。

开挖第4步完成后,双排内斜桩支护桩身净土压力总体小于前斜后直双排桩,这也是双排内斜桩

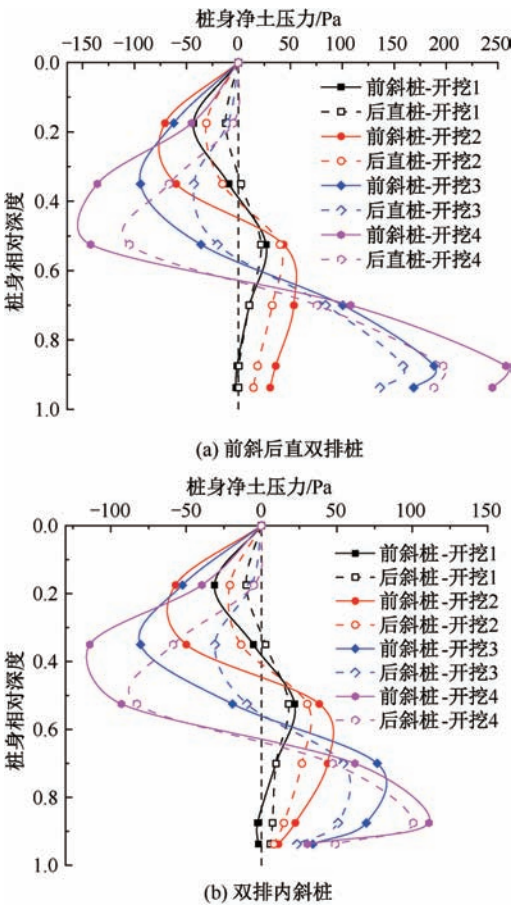


图 6 桩身净土压力随开挖深度的变化曲线
Fig. 6 Net soil pressure on piles during excavation

支护桩身水平位移和弯矩更小的主要原因。双排内斜桩的前排桩主动区净土压力绝对值为 118 Pa, 相较于前斜后直双排装的 155 Pa 减小 23.87%。这说明双排内斜桩支护受力模式优于前斜后直双排桩, 其支护性能更好。

3 双排斜直桩倾角影响数值分析

3.1 有限元模型及验证

有限元模型尺寸的大小对计算结果有较大的影响,按照文献[17]的建议,分析基坑开挖时,坑外土体垂直于坑边水平方向的计算范围,取 5 倍的基坑开挖深度,坑内土体取基坑开挖宽度的 0.5 倍,竖向计算范围取支护结构长度的 2 倍,计算模型宽度取一个支护结构单元及该单元所属土体的宽度。计算模型 4 个侧面法向位移为 0,底面 3 个方向位移为 0,顶面自由。

冠梁和桩分别采用梁和板单元模拟,按照等抗弯刚度原则将支护桩等效为板。土体本构采用小应变硬化模型,小应变模型参数除重度 γ 、孔隙比 e 、黏

聚力 c 、内摩擦角 φ 等常规参数外,还包括标准三轴排水试验割线模量 E_{50}^{ref} 、固结试验的切线模量 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、卸载再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 等,按照 $E_{50}^{\text{ref}} = (0.9 \sim 1.4)E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = (0.8 \sim 1.1)E_s$ 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = (4.5 \sim 13.6)E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 来取值。土体采用 10 结点四面体单元进行网格划分。采用界面单元模拟支护桩与土体之间的相互作用,界面单元强度参数取相邻土体强度参数的 65%。

有限元分析按下述步骤进行:① K_0 状态初始地应力平衡;②位移清零,激活桩、梁及界面单元;③基坑逐层开挖,自上而下分步选中需要挖去的土体,选择停用命令模拟基坑开挖直到坑底。

为验证上述有限元模型,分析倾斜桩支护基坑性状的合理性,首先,对模型试验进行数值模拟,模型尺寸为 1.22 m(长) $\times$ 0.77 m(宽) $\times$ 0.97 m(高),试验黄土的土体力学物理参数见表 1。再选取天津市某倾斜桩支护基坑工程^[18]进行分析。该基坑开挖宽度和深度分别为 55 和 4.9 m,地下水位在地表下 2 m 处,勘探深度范围内共有 7 层土,各土层厚度及有关参数见文献[18]。基坑支护采用截面尺寸为 375 mm $\times$ 500 mm 的钢筋混凝土空心矩形单排斜桩,桩身向基坑外倾斜 8°,桩长 12 m,桩间距 2.4 m,桩顶钢筋混凝土冠梁截面尺寸为 1 100 mm $\times$ 600 mm。基坑长边的支护变形及内力大于短边,因此,取基坑长边的支护作为分析对象。该基坑数值模型的几何尺寸为 80 m(长) $\times$ 2.4 m(宽) $\times$ 25 m(高)。

开挖至基坑底面时,桩身水平位移的计算值与实测结果如图 7 所示。可以看出,数值计算结果与现场实测值较为接近,这说明数值模型分析方法是可靠的。

3.2 有限元计算结果分析

以西安某高层住宅基坑为例,分析前斜后直双排桩及双排斜桩 2 种支护结构的支护效果,该场地土层参数见表 2,基坑深度 8 m,分 4 步开挖,每步开挖深度均为 2 m。2 种支护结构的斜桩及直桩的直径、长度分别为 0.8、16 m,桩间距为 3.0 m,连梁长度为 2.4 m,桩顶钢筋混凝土冠梁的截面尺寸为 11 m $\times$ 0.8 m $\times$ 0.5 m(长 $\times$ 宽 $\times$ 高),支护桩、冠梁和连梁的弹性模量均为 30 GPa、重度为 25 kN/m³、泊松比为 0.2,支护桩采用嵌入式梁单元进行网格划分,冠梁和连梁采用梁单元进行网格划分,土体采用小应变硬化模型。为比较斜桩倾角对支护效果的影

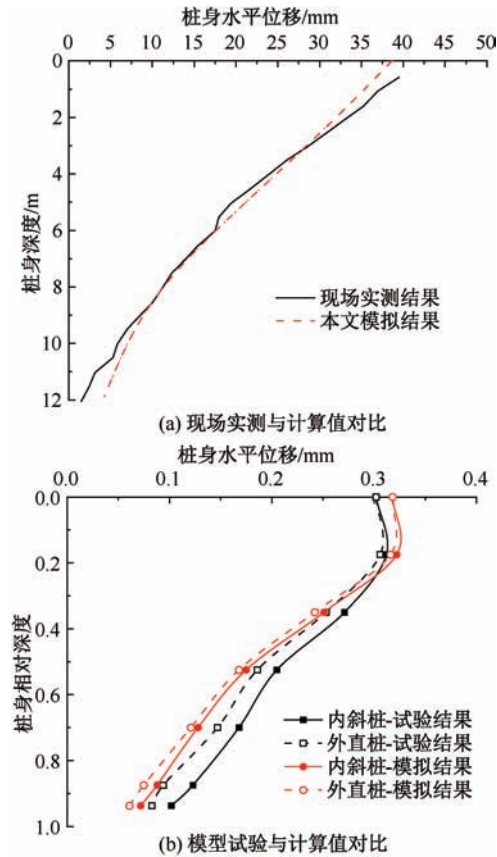


图 7 桩身水平位移的比较

Fig. 7 Comparison of pile horizontal displacements

响,斜桩倾角取为 5、10、15、20°,数值模拟模型如图 8 所示。

表 2 土层物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层名称	层厚/m	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	E /MPa
杂填土	3.00	14.60	21.00	16.00	2.20
新黄土	3.80	15.40	18.00	12.00	8.20
古土壤	3.40	18.00	28.00	15.00	16.70
老黄土	3.80	18.60	24.00	13.00	17.20
古土壤	18.00	19.10	35.00	17.70	21.30

3.2.1 桩顶水平位移

前斜后直双排桩与双排内斜桩支护结构桩顶水平位移随不同斜桩倾斜角度的变化曲线如图 9 所示,其中,支护结构向坑内位移为正。

随着开挖深度逐渐加深,2 种支护结构的桩顶水平位移显著增大。当基坑开挖深度较浅时,前斜后直双排桩与双排内斜桩支护结构向坑外轻微位移,其原因是基坑底部隆起,内斜桩所受到的力沿水

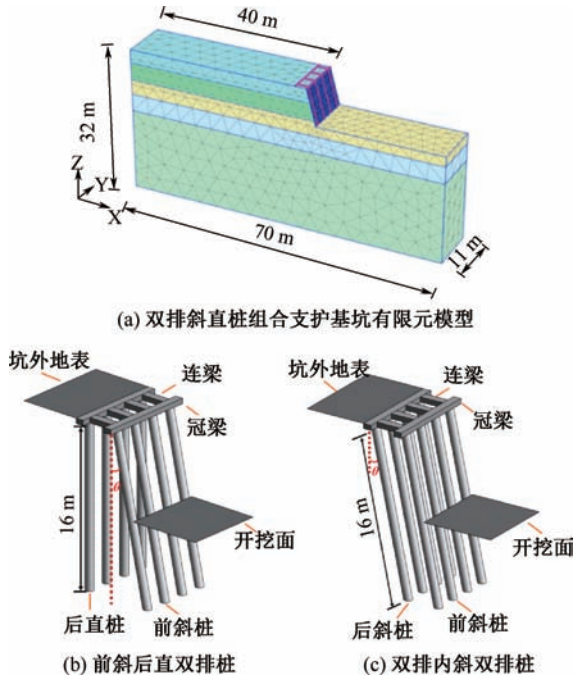


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

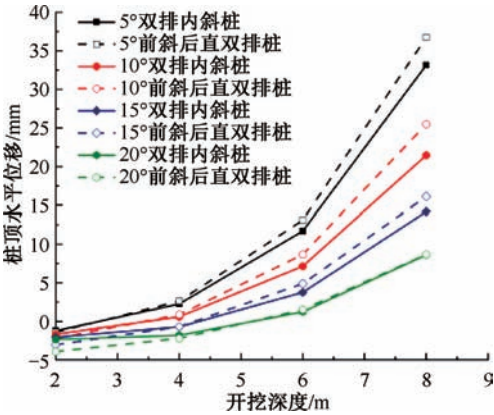


图 9 桩顶水平位移随桩身倾角的变化

Fig. 9 Horizontal displacement of pile top verse pile inclination

平方向分解为指向坑外的压力,类似于内支撑。

前斜后直双排桩与双排内斜桩的桩顶水平位移随着桩身倾角增大而减小。开挖完成后,10、15 和 20°的双排内斜桩较 5°双排内斜桩的桩顶水平位移分别减小 35.28%、57.21%和 73.97%,前斜后直双排桩的桩顶水平位移分别减小 30.62%、56.10%和 76.42%。这说明相同角度下,双排内斜桩的整体支护能力强于前斜后直双排装;斜桩倾角增大有利于控制支护结构桩顶水平位移,增强支护结构刚度。

3.2.2 坑外地表沉降

基坑开挖至坑底时,前斜后直双排桩与双排内

斜桩支护结构坑外地表沉降最大值随不同斜桩倾斜角度的变化曲线如图 10 所示,假定土体沉降为正。随着斜桩倾角不断增大,2 种支护结构坑外地表沉降最大值逐渐减小。斜桩倾角增大能够减小支护结构对基坑周围环境的影响,倾角更大的支护结构更适用于周围环境复杂的基坑工程,但其坑外地表沉降的减小幅度在减小。

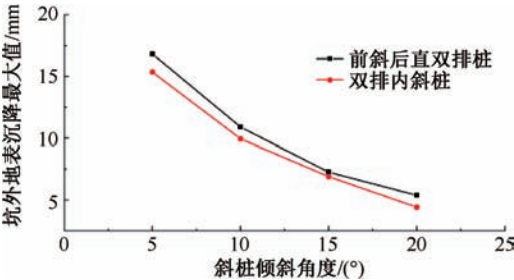


图 10 坑外地表沉降最大值随桩身倾角的变化
Fig. 10 Maximum settlement of ground surface verse pile inclination

3.2.3 桩身弯矩

基坑开挖至坑底时,2 种支护结构桩身最大弯矩随斜桩倾角的变化如图 11 所示。

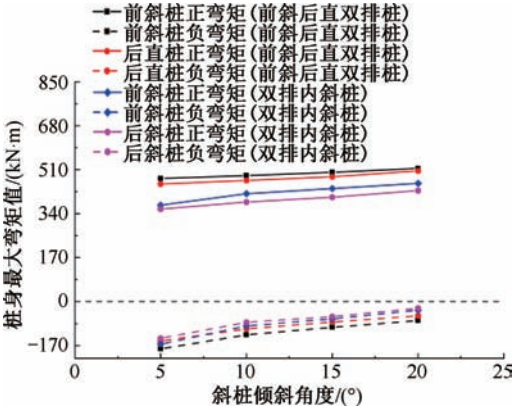


图 11 桩身最大弯矩随桩身倾角的变化
Fig. 11 Maximum bending moment of pile verse pile inclination

显然,桩身正弯矩随斜桩倾角增大而增大,负弯矩则减小,其中,前排桩桩身最大弯矩总是大于后排桩。20°前斜后直双排桩相比 5°前斜后直双排桩的前斜桩最大正弯矩增大 8.15%,而最大负弯矩减小 59.82%;20°双排内斜桩相比 5°双排内斜桩的前斜桩最大正弯矩增大 22.51%,而最大负弯矩减小 79.73%。增大斜桩倾角有利于改善支护桩的受力,提高支护结构刚度,其中,双排内斜桩桩身弯矩变化程度大于前斜后直双排桩,受力模式更好,支护性能更强。

3.2.4 桩身轴力

基坑开挖至坑底时,2 种支护结构桩身轴力随斜桩倾角的变化如图 12 所示,其中,支护桩轴力受压为正。从图 12 可以看出,随着桩身倾角不断增大,前排斜桩的桩身最大轴力逐渐减小,且双排内斜桩的减小幅度更大。其原因是侧向土压力与桩身法线方向相垂直,随着斜桩桩身倾角增大,桩身与水平方向的夹角增大,使得侧向土压力在水平方向的分量减小,轴力也相应减小;斜桩倾角增大导致支护结构桩身水平位移减小,导致桩土之间摩擦力相对较小。这说明增大斜桩倾角有利于提高支护结构的自撑效应,加强支护结构控制变形能力。

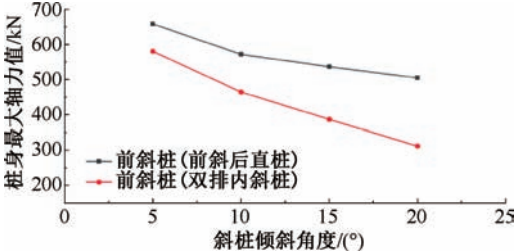


图 12 开挖完成后桩身轴力随桩身倾角的变化曲线

Fig. 12 Pile axial force verse pile inclination

3.2.5 桩后土体应力路径

由于滑裂面附近是基坑开挖过程中土体可能发生失稳破坏的关键区域,选取靠近滑裂面的点进行分析,如图 13 所示。

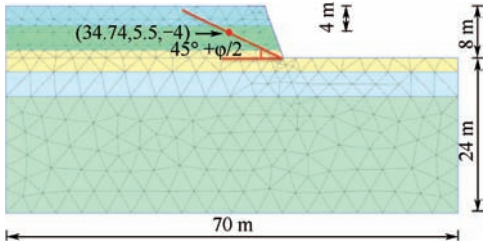


图 13 坑外应力点位置

Fig. 13 Stress point locations outside the pit

图 14 以斜桩倾角 15°为例给出桩后土体应力路径的变化,其中, p 为平均主应力, q 为广义剪应力。

图 14 中,应力路径变化曲线包含基坑开挖的 5 个阶段,即初始地应力平衡、开挖 1、2、3、4 步。随着挖深逐渐增大,平均主应力 p 不断减小,广义剪应力 q 逐渐增加,向破坏主应力 K_f 线逐渐靠近,土体的安全性逐渐降低,但其应力路径都在 K_f 线之下,双排内斜桩桩后土体应力路径离 K_f 线比前斜后直双排桩要远,双排内斜桩坑外土体更为安全。

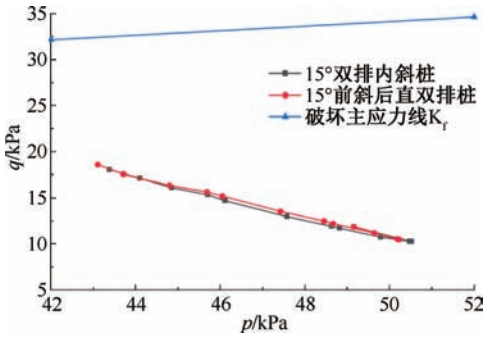


图 14 桩后土体应力状态随不同斜桩
倾斜角度的变化

Fig. 14 Soil stress path verse pile inclination

3.2.6 基坑稳定安全系数

采用强度折减法对比分析不同斜桩倾角的内斜直与外斜直组合基坑稳定性。目前还没有公认合理的黄土湿陷理论计算方法,因此,采用模量折减法进行湿陷模拟。将场地坑外与基底 50 cm 深度范围内的黄土重度修改为饱和重度,为避免计算不收敛,将该厚度范围内的土体黏聚力设置为一个很小值 0.1 kPa;黄土的内摩擦角和压缩模量的折减系数取 0.5。

基坑稳定安全系数随斜桩倾角的变化如图 15 所示。2 种支护结构基坑安全系数随着斜桩倾角增大而增大,但双排内斜桩支护的安全系数总是高于

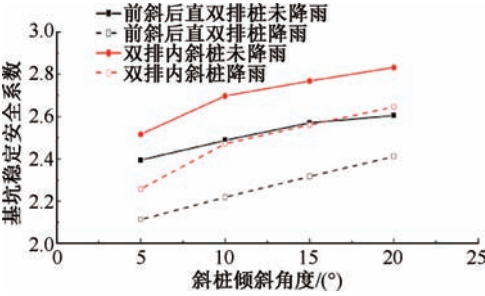


图 15 基坑安全系数随桩身倾角的变化

Fig. 15 Safety factor of pit verse pile
inclination angle

前斜后直双排桩。无论对于前斜后直双排桩还是双排内斜桩,降雨使得其支护基坑安全系数减小,但前斜后直双排桩基坑安全系数减小幅度大于双排内斜桩。

4 结 论

1) 双排内斜桩支护的桩身位移、桩顶位移、坑外土体沉降、桩身弯矩、桩身轴力及桩身净土压力相较于前斜后直双排装均有减小,双排内斜桩的支护效果优于前斜后直双排桩。

2) 随着斜桩倾角增加,双排斜直桩组合支护的桩顶位移、坑外土体沉降和桩身最大轴力均在减小,而桩身最大弯矩在增大,且双排内斜桩支护结构的变化幅度大于前斜后直双排桩,在一定范围内增大斜桩的倾角有利于提升支护结构的安全性和稳定性。

3) 双排斜直桩组合支护通过冠梁将前后排桩连接形成一个空间超静定结构体系,在这个体系中,前排桩主要承担土压力的作用,同时前排桩倾斜的设置,为结构体系提供支撑和稳定的效果,类似于斜撑结构,增强了整个结构体系的稳定性和抗倾覆能力;后排桩则起到拉锚、传递和分散土压力作用,与前排桩共同作用形成与土压力作用相抵消的反向力,偶以提升支护结构的稳定性,增强结构体系的稳定性;随着斜桩桩身倾角的增大,双排斜直桩组合支护的支护性能越好及安全性越高。

4) 双排内斜桩组合支护的桩后土体应力路径离破坏主应力 K_f 线比前斜后直桩组合支护更远,斜桩倾角越大离破坏主应力 K_f 线越远,支护性能越好,基坑的安全性及稳定性越高。

5) 双排内斜桩的稳定安全系数大于前斜后直双排桩;斜桩倾角增大,支护整体稳定安全系数提高,基坑稳定性增强,且双排内斜桩组合支护提高幅度更大。

参 考 文 献

[1] 张仲宇,李兆平,杨航,等. 并行基坑施工对邻近桥梁影响及保护措施[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 68-74.
ZHANG Zhongyu, LI Zhaoping, YANG Hang, et al. Study on influence of parallel foundation pit construction on adjacent bridge and protection measures [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 68-74.

[2] 张琦,王月峰,李建春,等. 深基坑紧邻地铁隧道安全评价方法[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 95-104.
ZHANG Qi, WANG Yuefeng, LI Jianchun, et al. Evaluation method for safety of subway tunnels adjacent to deep foundation pits [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 95-104.

[3] LAN Binpeng, WANG Yanping, WANG Weiguo. Review of the double-row pile supporting structure and its force and deformation characteristics[J]. Applied Sciences-Basel, 2023, 13(13): DOI: 10.3390/APP13137715.

[4] 周德泉,冯晨曦,肖灿,等. 倾斜软基上斜直桩组合结构单侧受力破坏模式试验[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 201-214.

- ZHOU Dequan, FENG Chenxi, XIAO Can, et al. Experimental study on the failure mode of inclined-straight pile composite structure on declining soft foundation under single side load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 201–214.
- [5] 周德泉, 肖灿, 冯晨曦, 等. 侧向堆载下斜桩长度影响斜-直双排桩受力响应试验研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(2): 24–32.
- ZHOU Dequan, XIAO Can, FENG Chenxi, et al. Experimental study on influence of inclined pile length on mechanical response of inclined-straight double-row piles under lateral surcharge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(2): 24–32.
- [6] 周德泉, 曹之烨, 冯晨曦, 等. 倾斜度影响斜-直组合桩单侧受力响应试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2021, 52(7): 2 426–2 437.
- ZHOU Dequan, CAO Zhiye, FENG Chenxi, et al. Model test on bearing characteristics of inclined-vertical combined pile with varied inclination of inclined piles under single lateral load [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(7): 2 426–2 437.
- [7] 徐源, 郑刚, 路平. 前排桩倾斜的双排桩在水平荷载下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增1): 93–98.
- XU Yuan, ZHENG Gang, LU Ping. Behaviors of double-row contiguous retaining piles with raking front-row piles under horizontal loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 93–98.
- [8] 叶金钊, 周先齐, 王晨飞, 等. 基坑双排斜桩模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(2): 398–404, 519.
- YE Jinbi, ZHOU Xianqi, WANG Chenfei, et al. Model test of double-row inclined piles in foundation pit [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(2): 398–404, 519.
- [9] 田野, 宋志, 张涛, 等. “前斜后直”倾斜桩基坑支护在武汉深厚淤泥质层中的设计与应用[J]. 建筑技术, 2021, 52(11): 1 288–1 291.
- TIAN Ye, SONG Zhi, ZHANG Tao, et al. Design and application of inclined pile with inclined head and straight body for foundation pit support in deep and thick silt stratum in Wuhan [J]. Building Technology, 2021, 52(11): 1 288–1 291.
- [10] 田野, 陈国, 宋志, 等. 基坑工程倾斜桩及其与多级支护组合的工程应用研究[J]. 建筑施工, 2021, 43(6): 983–986.
- TIAN Ye, CHEN Guo, SONG Zhi, et al. Engineering application research on inclined pile and its combination with multi-stage support in foundation pit engineering [J]. Architecture Technology, 2021, 43(6): 983–986.
- [11] JIANG Yuenan, CHEN Runze, SHAO Suola, et al. The behavior and optimization analysis of double-row piles in different forms[J]. Jordan Journal of Civil Engineering, 2022, 16(3): 365–380.
- [12] YE Jinbi, WANG Chenfei, HUANG Weipeng, et al. Effect of inclination angle on the response of double-row retaining piles: experimental and numerical investigation[J]. Tehnički Vjesnik, 2020, 27(4): 1 150–1 159.
- [13] 阮从威, 梁鸽, 谭江蜀, 等. 前斜后直双排桩施工技术研究与应[J]. 建筑机械化, 2023, 44(4): 63–67.
- RUAN Congwei, LIANG Hu, TAN Jiangshu, et al. Research and application of construction technology of front inclined and rear straight double row piles [J]. Construction Mechanization, 2023, 44(4): 63–67.
- [14] WU Yibin, YE Jinbe, GE Hongbin, et al. Numerical investigation of dual-row batter pile wall in deep excavation[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(27): 5 793–5 807.
- [15] 田野, 宋志, 张松波, 等. 武汉长江阶地无支撑倾斜桩基坑支护应用及选型分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增1): 2 044–2 049.
- TIAN Ye, SONG Zhi, ZHANG Songbo, et al. Application and type selection analysis of unsupported inclined pile foundation pit in Wuhan Yangtze River terrace [J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 2 044–2 049.
- [16] 郑刚, 王玉萍, 程雪松, 等. 软土地区基坑前排倾斜双排桩支护现场试验及工作机理[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(6): 98–105, 113.
- ZHENG Gang, WANG Yuping, CHENG Xuesong, et al. Field experiment and working mechanism study on the excavation retained by inclined double row piles in soft soil area [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(6): 98–105, 113.
- [17] 黄传胜, 张家生. 地铁深基坑三维有限元模型尺寸效应分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(2): 59–63.
- HUANG Chuansheng, ZHANG Jiasheng. Size effect analysis of subway deep foundation pit using three-dimensional finite element model [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(2): 59–63.
- [18] 刘涛. 倾斜桩在基坑支护中的作用机理和简化计算方法[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- LIU Tao. Mechanism and simplified calculation method of inclined piles in foundation pit support [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.



作者简介: 曹卫平 (1969—),男,陕西杨凌人,博士,教授,主要从事黄土桩基工程及软土地基处理等方面的研究。E-mail: capwp@xauate.edu.cn。