

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.044

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



基于桩周土加固效应的双排桩承载性状模型试验研究

王祥秋, 廖镇源, 郑土永, 朱道立

(佛山科学技术学院交通与土木建筑学院, 广东 佛山 528225)

摘要:双排桩在复杂环境条件深基坑工程中具有广泛的应用前景,针对双排桩复杂的承载性状与力学性态,基于相似材料模型试验原理,构建深基坑工程双排桩室内试验模型,对桩间土、桩侧被动区、桩端土体以及未加固等4种工况下双排桩的承载特性进行分析研究。研究表明:当采取桩间土加固措施时,前排桩最大正、负弯矩相对于未采取加固措施时分别降低了32.4%和38.5%,后排桩桩身最大正、负弯矩分别降低了76.8%和55.4%,而桩顶水平位移降低约57.5%,加固效果十分显著。桩间土、桩侧被动区以及桩端土加固均可有效提高双排桩的承载性能,但以桩间土加固效果为最好,主要原因是桩间土加固可显著提高桩间土的变形模量,增强桩土复合承载体截面整体抗弯刚度,从而提高双排桩的承载能力。

关键词:双排桩;模型试验;加固效应;桩土复合承载体

中图分类号:TU94 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)02-0019-07

Model test study on bearing characteristics of double-row piles based on reinforcement effect of soil around piles

WANG Xiangqiu, LIAO Zhenyuan, ZHENG Tuyong, ZHU Daoli

(School of Transportation and Civil Architecture, Foshan University, Foshan 528225, Guangdong, P. R. China)

Abstract: In view of the wide application of double row piles under complex surrounding environment and the complex mechanical behavior of double row piles, based on the principle of similar material model test, a laboratory test model for double row piles of deep foundation pit was built. The bearing characteristics of double-row piles under four kinds of working conditions, including inter-pile soil, passive zone at pile side, soil at pile end and un-reinforcement, were analyzed and studied. The results show that the maximum positive and negative bending moments of front row piles are 32.4% and 38.5% lower than those without reinforcement measures, while the maximum positive and negative bending moments of back row piles are 76.8% and 55.4% lower respectively, while the horizontal displacement of top piles is 57.5% lower. The bearing capacity of double-row piles can be effectively improved by soil reinforcement between piles,

收稿日期:2020-02-07

基金项目:国家自然科学基金(51278121);广东省特色创新重点项目(2018KTSCX247);佛山科学技术学院高层次人才及岭南学者科研启动项目(2018 GL 0029);研究生自由探索基金(2019ZYTS28)

作者简介:王祥秋(1968-),男,教授,博士,主要从事岩土与地下结构工程研究,E-mail:tongji_wxq@163.com.

Received:2020-02-07

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51278121); Key Projects of Characteristic Innovation in Guangdong Province (No. 2018KTSCX247); High Level Talents and Lingnan Scholars Research Start-up Project of Foshan University (No. 2018 GL 0029); Graduate Free Exploration Fund Project for Graduate Student (No. 2019ZYTS28)

Author brief: WANG Xiangqiu (1968-), professor, PhD, main research interests: geotechnical and underground structural engineering, E-mail: tongji_wxq@163.com.

passive zone at pile side and soil reinforcement at pile end, but the effect of soil reinforcement between piles is the most significant. The main reason is that soil reinforcement between piles can significantly improve the deformation modulus of soil between piles, thereby enhancing the overall flexural rigidity of the cross-section of pile-soil composite bearing body, then improving the bearing capacity of double-row piles.

Keywords: double-row piles; model test; strengthened effect; bearing body of pile-soil composite

在城市建筑密集区,因受周边环境条件以及用地红线等因素影响,双排桩已越来越广泛地应用于城市深基坑支护工程。但由于双排桩受力机制(特别桩土间相互作用机理)十分复杂,目前,关于双排桩的设计理论尚不够成熟。为此,学者们针对深基坑双排桩支护体系做了大量的研究工作。其中,具有代表性的主要有:理论研究方面,Xiao等^[1]、黄凭等^[2]通过提出一假想剪切滑裂面,采用体积比例法和“m”法求解双排桩上的土压力,并由此建立桩体的挠曲微分方程对双排桩的内力与变形进行分析计算。Zhao等^[3]通过数值模拟研究无连梁悬臂式双排支护桩在开挖过程中的受力特性。Huang^[4]通过建立门式双排桩力学性能微分方程,基于高精度龙格-库塔有限差分法提出一种计算双排桩内力和位移的新方法。杨光华等^[5]针对传统双排桩土压力计算模式未能充分考虑桩和土之间相互作用的不足,提出一种改正的双排桩土压力计算模式。王俊杰等^[6]提出了可同时考虑地基抗力和桩-承台协调作用的设计计算方法,推导了桩基和承台内力与变形的计算公式。曹净等^[7]通过引入等效桁架模型,将前、后排桩桩间土等效为平面桁架结构,进而提出一种基坑双排桩支护结构的改进计算模型。李松等^[8]提出一种考虑前排桩抗压、后排桩抗拔力偶和地下水浮力对双排桩抗倾覆安全系数影响的改进计算方法。试验研究方面,Yu等^[9]、Shen等^[10]、彭文祥等^[11]通过室内试验模型研究了双排桩排距、行距和开挖深度等参数对双排桩内力及变形的影响。Buslov等^[12]基于框架结构柔性桩以及组合刚架假设,通过对双排桩路基支护结构土压力测试成果,研究了双排桩支护结构中后排桩的承载特性。范刚等^[13]利用大型振动台进行双排抗滑桩加预应力锚索加固边坡的模型试验,研究在震动作用下预应力锚索双排桩的破坏机理与承载特性。郑轩等^[14]通过地层和双排桩支护结构的相似材料模型,模拟基坑开挖过程,探究双排桩的变形规律,并建立数值模型对试验结果进行验证。目前,关于双排桩支护结构的研究大都基于双排桩的排距、桩间距以及桩长等不同设计参数对其受力特性的影响,针对桩周

土体加固效应对双排桩支护结构受力特性影响的研究尚鲜见报道。笔者基于模型试验原理^[15],通过室内试验,重点研究桩间土以及桩侧土体加固效应对双排桩支护结构受力特性及变形规律的影响,从而为深基坑工程双排桩设计与施工提供理论与试验参考。

1 双排桩模型试验

1.1 模型试验设计

双排桩室内模型试验基于相似模型试验理论进行设计,研究对象原型为开挖深度为7 m的粉细砂地层深基坑工程。为了研究桩间土、桩侧土加固以及桩底土层性质对双排桩支护特性的影响,试验过程中保持双排桩的设计参数不变,只改变桩间土以及桩周土的力学性质。根据试验模型箱的尺寸及研究重点,确定模型试验的几何相似比为 $C_L=1:10$,容重相似比为 $C_\gamma=1:1$ 。土层选用级配良好的粉细砂原型料,桩间以及桩侧加固土体则采用石膏、水泥以及细砂混合料,其中,石膏和水泥的掺入比分别为10%和5%,配合比为水:石膏:水泥:细砂=1:1:0.5:7.5。双排桩底部加固土体采用M2.5水泥砂浆进行模拟。模型试验材料参数如表1所示。

表1 模型试验材料参数

Table 1 Material parameters of model test

材料	干容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	压缩模 量/MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
中细砂	20.3	2.1	0.29	0.0	35.0
加固土	19.7	2.9	0.33	21.5	25.0
模型桩	17.0	3 000	0.26		

双排桩模型参数为前、后排模型桩均采用PVC管桩,直径75 mm(壁厚2.3 mm),桩长1 300 mm,排距225 mm,桩间距150 mm,桩顶设置长×宽×厚度为970 mm×300 mm×7 mm的有机玻璃板,盖板与桩顶采用ERGEO5800强力胶粘接。为防止开挖过程中砂土从前排桩桩间流出,在前排桩后侧设置一道泡沫挡土板,试验模型设计参数如图1所示。

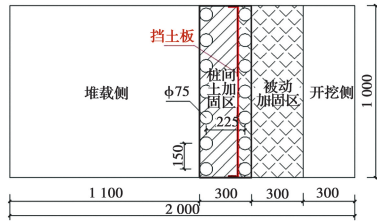


图 1 双排桩试验模型设计图

Fig. 1 Model design of double-row pile test

根据深基坑工程设计与施工经验,共设计了 4 种试验模型,以模拟桩间土、桩端土以及被动区土体加固效应对双排桩承载特性的影响。其中:桩间土加固深度为 1 300 mm,桩底加固厚度为 500 mm (模拟强风化岩层),被动区加固深度和宽度分别为 500、300 mm。试验模型具体参数如表 2 所示。

表 2 双排桩试验模型参数

Table 2 Model parameters of double-row pile test

模型 编号	模型桩设计参数						加固条件
	桩长/mm	桩径/mm	前后排桩数	桩间距/mm	排距/mm	桩底土层厚度/mm	
SY1	1 300	75	14	150	225	500	未加固
SY2	1 300	75	14	150	225	500	桩底加固
SY3	1 300	75	14	150	225	500	桩间土加固
SY4	1 300	75	14	150	225	500	被动区加固

1.2 试验装置及开挖工况

由于深基坑工程双排桩支护结构在桩侧土压力作用下主要产生弯曲效应,故在前后排桩桩身两侧对称粘贴应变片(应变片型号为 BE120-5AA(11),阻值 120.0 Ω,灵敏系数 2.11,格栅长 5 mm,宽 2.8 mm)。应变片具体布设方式如图 2 所示。试验过程中采用东华 D3650 应变采集系统采集不同试验模型在各分步开挖工况下前后排桩的桩身弯曲应变,双排桩桩顶水平位移则利用数显百分表进行测量。

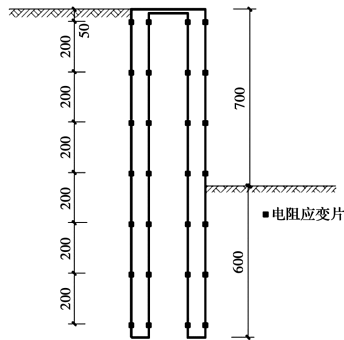


图 2 双排桩应变片布设方案

Fig. 2 Scheme of strain gauges for double-row piles

双排桩试验模型在长×宽×高=4.0 m×1.0 m×2.0 m的岩土试验箱体内制作,砂土及加固土采用同步分层填埋与压实,每次填埋压实厚度为 150 mm,填埋至设计标高后,利用混凝土立方体试块施加 5 kPa 超载(按模型几何相似比,相当于实际超载 50 kPa)进行堆载预压 3 d。基坑开挖深度 700 mm,共分 7 个开挖步,每一开挖步的平均开挖深度为 100 mm。开挖

过程中,为了减少开挖对土层及模型桩的扰动,采用抹泥刀分层剥离开挖。每一开挖步完毕后,待模型桩变形达到稳定标准时,采集桩身应变及桩顶水平位移。双排桩模型试验过程如图 3 所示。

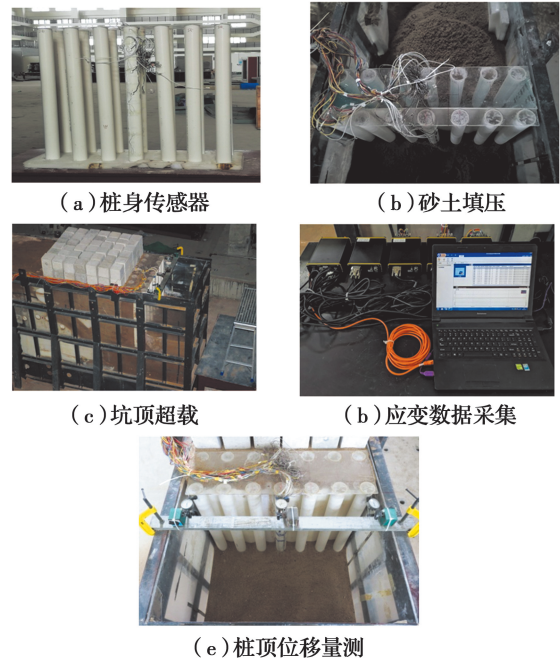


图 3 双排桩模型试验过程

Fig. 3 Model test process of double row piles

2 模型试验结果及分析

2.1 桩身弯曲效应分析

基坑开挖到底时各加固工况条件下双排桩前、

后排桩身弯矩量测值如表 3 所示。

为了分析研究不同加固工况对双排桩桩身弯矩

的影响,由试验数据绘制前后排桩弯矩变化趋势图,

如图 4 所示。

表 3 不同加固条件双排桩桩身弯矩值

Table 3 Bending moment of double-row piles under different reinforcement conditions

截面 位置/m	前排桩弯矩/(N·m)				后排桩弯矩/(N·m)			
	SY1	SY2	SY3	SY4	SY1	SY2	SY3	SY4
0.05	68.776	62.122	57.162	48.671	31.401	14.666	7.261	14.709
0.25	106.715	98.311	72.103	91.60	13.466	-6.436	-20.958	-14.637
0.45	82.733	87.853	34.887	72.29	-1.895	-31.459	-42.61	-65.000
0.65	3.659	-20.582	11.094	-36.434	-36.044	-48.193	-39.602	-98.369
0.85	-96.966	-122.365	-88.533	-157.666	-89.618	-83.283	-40.325	-92.265
1.05	-143.945	-117.187	-48.874	-74.257	-90.458	-86.624	-23.590	-45.185
1.25	-46.415	-77.873	0.492	-15.881	-36.073	-76.065	-13.133	-10.500

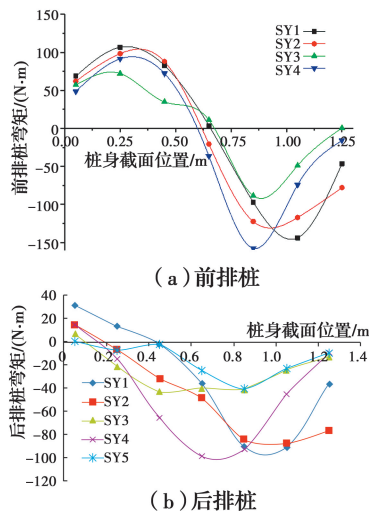


图 4 不同加固条件双排桩桩身弯矩图

Fig. 4 Bending moment diagram of double-row piles under different reinforcement conditions

由图 4 可知,不同加固工况条件下,双排桩前、后排桩的桩身弯矩值及其变化趋势存在显著差异,呈现出截然不同的加固效果。当采用桩间土加固、桩侧被动区加固以及桩底加固等单一加固措施时,前排桩桩身最大正弯矩分别为 72.103、91.60、98.311 N·m,与未采取加固措施时前排桩桩身最大正弯矩 106.715 N·m 相比,分别下降了 32.4%、14.1%和 7.8%;前排桩桩身最大负弯矩分别为 88.53、157.666、122.365 N·m,与未采取加固措施时前排桩桩身最大负弯矩 143.945 N·m 相比,分别下降了 38.5%、-9.5%和 15.0%;后排桩桩身最大正弯矩分别为 7.261、14.709、14.666 N·m,与未采

取加固措施时后排桩桩身最大正弯矩 31.401 N·m 相比,分别下降了 76.8%、53.2%和 53.1%;后排桩桩身最大负弯矩分别为 40.325、98.369、86.624 N·m,与未采取加固措施时后排桩桩身最大负弯矩 90.458 N·m 相比,分别下降了 55.4%、-8.7%和 4.3%。由此可见,当采用单一加固措施时,以桩间土加固效果最显著,前、后排桩的弯矩值相较于未采取加固措施时显著降低;桩底加固效果次之;桩侧被动区加固对降低前后排桩桩身弯矩值效果最不明显。实际工程中,可将搅拌桩或高压旋喷桩止水帷幕设置于前后排桩之间,对桩间土进行加固处理,可有效提高双排桩承载能力。

2.2 桩顶水平位移特性分析

由试验结果可见,基坑开挖到底时,各加固工况条件下双排桩桩顶水平位移量测值如表 4 所示,根据试验数据绘制桩顶水平位移的变化规律如图 5 所示。

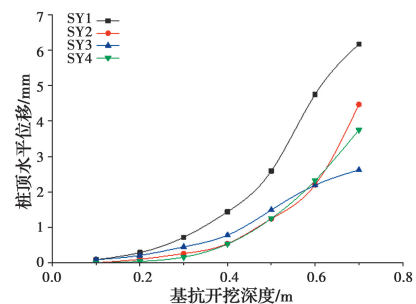


图 5 双排桩桩顶水平位移图

Fig. 5 Horizontal displacement diagram of top of double-row piles

表 4 不同加固条件双排桩桩顶水平位移

Table 4 Horizontal displacement of top of double-row piles under different reinforcement conditions

开挖深度/m	桩顶水平位移/mm			
	SY1	SY2	SY3	SY4
0.1	0.09	0	0.09	0
0.2	0.29	0.1	0.21	0.04
0.3	0.72	0.26	0.45	0.16
0.4	1.44	0.54	0.78	0.53
0.5	2.59	1.24	1.49	1.25
0.6	4.75	2.2	2.19	2.32
0.7	6.17	4.47	2.62	3.75

由图 5 可知,不同加固工况条件下,双排桩桩顶水平位移随开挖深度呈现出相似的变化规律,即随开挖深度的增大而不断增加,但双排桩桩顶水平位移最大值存在显著差异,表现出截然不同的加固效果。当采用桩间土加固、桩侧被动区加固以及桩底加固等单一加固措施时,双排桩桩顶水平位移最大值分别为 2.62、3.75、4.47 mm,相较于未采取加固措施时分别减少了 57.5%、39.2%和 27.6%,表明对双排桩桩间土体、桩侧被动区土体以及桩底土体进行加固或者将桩底嵌入强度较高的岩土层时,均可有效控制双排桩水平位移,但以桩间土加固对控制双排桩变形效果最好。

2.3 开挖深度对双排桩内力影响分析

不同加固条件下双排桩前后排桩桩身弯矩随基坑开挖过程的变化趋势如图 6 所示。由图 6 可知,桩底加固与桩侧被动区加固两种工况条件下,前、后排桩桩身弯矩随开挖深度呈现出相似的变化规律,且桩身正、负弯矩值基本相等。而桩间土加固条件下前、后排桩桩身弯矩随开挖深度表现出不同的变化规律,且桩身正、负弯矩值与桩底加固和桩侧被动区加固两种工况相比均有大幅度降低,降低幅度约为 30%,这可能与桩间土在基坑开挖以及围护桩变形过程中受到前、后排桩共同约束,并与前、后排桩组成共同承载体有关。当对桩间土进行加固处理之后,其变形模量显著提高,由此增强了桩土复合体的截面抗弯刚度,从而改变了桩土复合体的承载特性,使前、后排桩桩身内力呈现出不同的变化规律。实际工程中,可充分利用桩间土共同作用的力学特性,优化深基坑工程双排桩设计参数与施工工况。

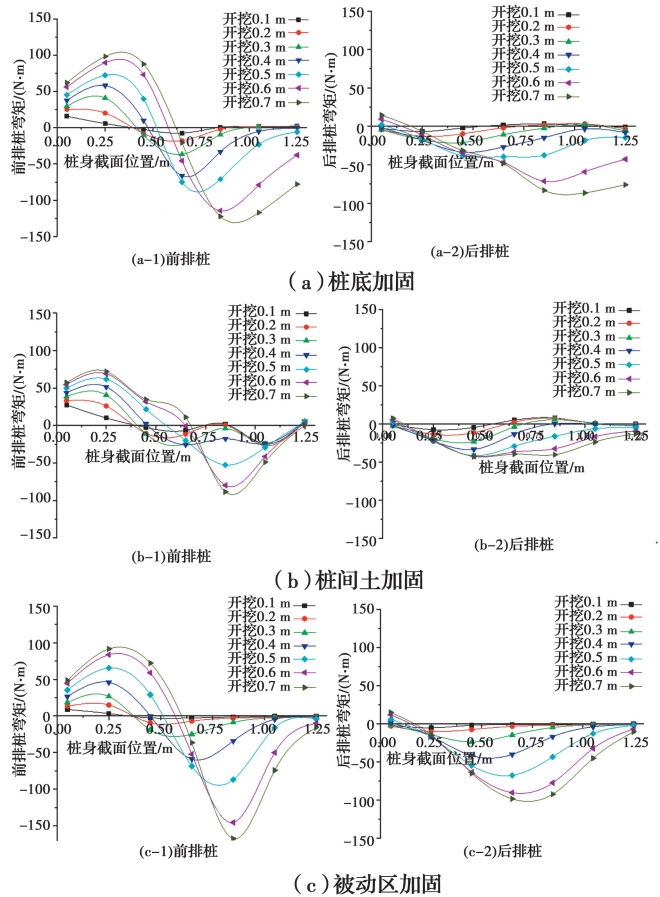


图 6 双排桩桩身弯矩-开挖深度关系曲线
Fig. 6 Curves of bending moment-excavation depth for double-row piles

与此同时,不同加固条件下,双排桩前、后排桩桩身弯矩值随基坑开挖工况(即开挖深度变化)呈现出相似的变化规律。如图 6 中(a-1)、(b-1)、(c-1)所示,前排桩桩身最大正、负弯矩值均随基坑开挖深度增大而不断增加。但桩身最大正弯矩值的位置则随着基坑开挖深度的增加逐步向基坑开挖面移动;而桩身最大负弯矩值均位于基坑开挖面以下,其位置均随着基坑开挖深度的增大逐步向桩底移动。而后排桩桩身弯矩则与前排桩表现出截然不同的变化规律,如图 6 中(a-2)、(b-2)、(c-2)所示,不同加固条件下,后排桩桩身弯矩均表现为负弯矩值,且在地表处桩身弯矩几乎为零,随着基坑开挖深度不断增加,桩身负弯矩值逐步增大,并在基坑开挖面附近达到最大值,而在基坑开挖面以下,桩身负弯矩值逐步减小,并在桩底处达到最小值。

2.4 桩间土压力变化特性分析

为了研究双排桩与桩间土相互作用特性,在前排桩与桩间土之间埋设了应变式土压力盒,3 个土

压力盒分别位于基坑表面 0.25、0.45、0.65 m 处(3 个测点均位于基坑底面以上),在未加固与桩间土加固两种典型工况条件下,前排桩与桩间土接触界面土压力-基坑开挖深度关系曲线(如图 7 所示)。

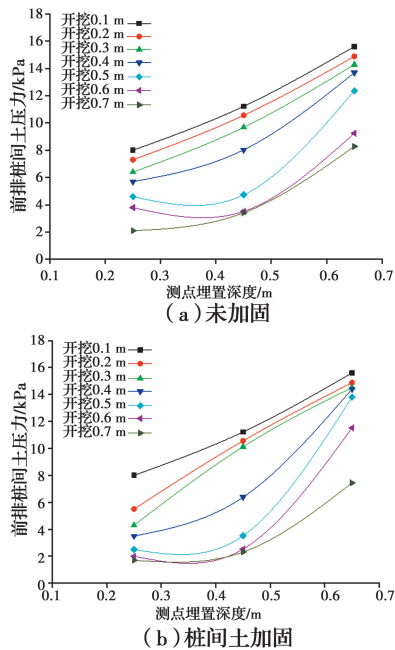


图 7 桩土界面土压力-开挖深度关系曲线

Fig. 7 Curves of soil pressure on the interface between pile and soil to excavation depth

由图 7 可知,未加固与桩间土加固两种工况下,前排桩与桩间土接触界面土压力呈现出相似的变化规律,即随着开挖深度不断增大,桩土界面土压力不断减少,且在桩顶部位土压力降低的幅度最大。这可能因为双排桩类似于刚架结构,当双排桩向基坑内发生位移时,前排桩与桩间土之间存在脱离的趋势,从而导致桩土间接接触界面压力降低。但后排桩与桩间土之间由于双排桩存在向基坑内的水平位移所产生的挤压效应,导致桩土界面土压力增大。与此同时,由图 7 可知,当基坑开挖深度少于 0.3 m 时(第 3 开挖步之前),土压力降低的幅度较少,而当开挖深度超过 0.4 m 时(即开挖工况 4 之后),土压力降低幅度增大,这可能与双排桩位移增大,前排桩与桩间土之间脱离趋势加剧有关。

3 结论

1) 双排桩桩间土加固、桩侧被动区加固以及桩端土层加固(或者置于良好岩土地层)均可有效降低前、后排桩桩身最大正、负弯矩值。若采用单一加固措施,以桩间土加固效果优于桩侧被动区以及桩端

土层加固。实际工程可将止水帷幕设置于桩间土内,以提高深基坑工程综合效益。

2) 对深基坑双排桩支护结构的桩间土进行加固时,可显著提高桩间土的变形模量,由此增强桩土复合体截面的整体抗弯刚度,从而提高桩土复合体的承载能力,并使前、后排桩桩身内力呈现出不同的变化规律。实际工程中,可充分利用桩间土共同作用的力学特性,优化深基坑工程双排桩设计参数与施工工况。

3) 对双排桩支护结构深基坑工程桩间土体、桩侧被动区土体以及桩底土层进行加固或者将桩底嵌入强度较高的岩土层时,均可有效控制双排桩水平位移,并以桩间土加固对控制双排桩支护结构变形效果最好,在城市建构筑物与地下管线密集区域以及对基坑变形有严格要求的复杂环境条件下,可充分利用桩间土加固措施有效控制基坑变形。

参考文献:

- [1] XIAO S G, ZENG J X, YAN Y P. A rational layout of double-row stabilizing piles for large-scale landslide control [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(1): 309-321.
- [2] 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 (Sup2): 3870-3875.
- [3] HUANG P, MO H H, CHEN J S. Theoretical analysis of double-row piles retaining structure deflection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup2): 3870-3875. (in Chinese)
- [4] ZHAO X B, YE J B. Analysis of cantilever double-row piles in deep foundation pit based on FLAC3D [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19(D): 845-853.
- [5] HUANG C. Boundary value problem for analysis of portal double-row stabilizing piles [J]. Journal of Applied Mathematics, 2013, 2013: 1-10.
- [6] 杨光华, 黄忠铭, 姜燕, 等. 深基坑支护双排桩计算模型的改进 [J]. 岩土力学, 2016, 37(Sup2): 1-15.
- [7] YANG G H, HUANG Z M, JIANG Y, et al. Improvement of calculation model of double-row piles for supporting deep excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup2): 1-15. (in Chinese)
- [8] 王俊杰, 杨恒. 双排桩-承台-挡墙组合结构设计计算方法 [J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(2): 442-452.

- WANG J J, YANG H. Design and calculation method of double row piles-platform-wall composite structure [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(2): 442-452. (in Chinese)
- [7] 曹净, 钱国伟, 杨泽帅, 等. 基于等效桁架模型的基坑双排桩结构计算模型研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(6): 943-949.
- CAO J, QIAN G W, YANG Z S, et al. Study on calculation model of double-row piles retaining wall based on equivalent truss model [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(6): 943-949. (in Chinese)
- [8] 李松, 马郎, 张德乐, 等. 双排桩支护结构抗倾覆稳定性改进计算与分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 92-97, 106.
- LI S, MA Y, ZHANG D L, et al. Stability against overturning of supporting structure with double-row piles: Improved calculation and analysis [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(6): 92-97, 106. (in Chinese)
- [9] YU F, XIE Z B, DUAN N, et al. Performance of double-row piles retaining excavation beneath existing underground space [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2019, 19(4): 167-180.
- [10] SHEN Y J, WU Z J, XIANG Z L. Physical test study on double-row long-short composite anti-sliding piles [J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13(4): 621-640.
- [11] 彭文祥, 刘彬. 深基坑双排桩支护排距室内模型试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(1): 121-127.
- PENG W X, LIU B. Indoor model test study on row spacing of double-row piles supporting deep excavation pit [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(1): 121-127. (in Chinese)
- [12] BUSLOV A, MARGOLIN V. The interaction of piles in double-row pile retaining walls in the stabilization of the subgrade[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2018, 692: 769-775.
- [13] 范刚, 张建经, 付晓, 等. 双排桩加预应力锚索加固边坡锚索轴力地震响应特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1095-1103.
- FAN G, ZHANG J J, FU X, et al. Axial force of anchor cables in slope reinforced by double-row anti-slide piles and pre-stressed anchor cables [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 1095-1103. (in Chinese)
- [14] 郑轩, 朱文秀, 周一君. 双排桩支护结构变形规律模型试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(Sup1): 763-767.
- ZHENG X, ZHU W X, ZHOU Y J. Model tests study on deformation mechanism of double-row-piles wall [J]. Building Structure, 2018, 48(Sup1): 763-767. (in Chinese)
- [15] 张强勇. 地下工程模型试验新方法、新技术及工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- ZHANG Q Y. New method, new technology and engineering application of underground engineering model test [M]. Beijing: Science Press, 2012.

(编辑 胡玲)