

文章编号:1673-9469(2023)01-0009-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.01.002

长短组合双排桩基坑支护体系分析及应用

万雪林¹, 张鹏²

(1. 中国煤炭地质总局水文地质局, 河北邯郸 056004; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东青岛 266520)

摘要: 结合邯郸市某支护工程在处理基坑深度变化时的设计过程, 针对双排桩中前后排桩不同的受力特性, 提出了长短组合双排桩设计思路, 通过理正软件对各种工况进行分析计算, 得出了在安全可靠以及该基坑现状条件能够实施的前提下, 较为经济的长短组合双排桩解决方案。实践结果表明, 长短组合双排桩支护体系能够充分发挥前后排桩的不同作用, 可用于解决基坑深度变化后既有支护桩嵌固深度不足的问题, 也可以在正常基坑支护设计时采用。

关键词: 基坑支护; 长短组合双排桩; 嵌固深度

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Analysis and Application of Double Row Pile Pit Support System with Different Lengths

WAN Xuelin¹, ZHANG Peng²

(1. Hydrogeological Exploration Bureau, CNACC, Handan, Hebei 056004, China; 2. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China)

Abstract: Combined with the design process of a support project in Handan city when dealing with the change of the depth of the foundation pit, in view of the different stress characteristics of the front and rear rows of the double row piles, the design idea of the long and short combined double row piles is proposed. Through the analysis and calculation of various working conditions by the straightening software, a more economical solution of the long and short combined double row piles is obtained on the premise of safety and reliability and the implementation of the current conditions of the foundation pit. The practice results show that the long and short combined double row pile support system can give full play to the different functions of the front and rear rows of piles, and can be used to solve the problem of insufficient embedded depth of existing support piles after the change of foundation pit depth, and can also be used in the normal foundation pit support design.

Key words: foundation pit support; double-row pile with different lengths; embedded depth

支护桩是常用的基坑支护结构类型, 双排桩是指沿基坑侧壁排列设置相隔一定间距的前、后排桩及桩顶梁构成的刚架结构^[1]。目前, 针对双排桩的变形和受力状况已有很多学者进行了大量研究, 聂庆科等的研究表明双排桩相比单排桩支护能更好地控制基坑开挖产生的桩身变形, 并且能优化桩身的受力特性^[2-5]。还有学者对异型排桩进行了研究, 陈富强等提出了长短组合排桩共同作用支护体系^[6-7], 研究了单排长短桩协同作用

下的实际受力和变形。郑刚等提出了斜直交替双排桩支护体系^[8-10], 用一斜一直或一斜两直的支持形式, 能够在降低施工难度的同时减少直桩的受力。邓小鹏等采用数值模拟和模型试验对各种双排桩支护形式的受力变形特性进行了对比研究^[11-13]。但目前针对基坑支护工程中前后排桩桩长不等的双排桩研究比较少。对此, 本文选取邯郸市某基坑工程在采用双排桩处理原有支护桩嵌固深度不足时的实际工程案例, 提出了前排短桩、

收稿日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42177167)

作者简介: 万雪林(1979-), 男, 河北保定人, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程设计施工工作。

后排长桩的长短组合双排桩设计思路,可供类似项目参考和探讨。

1 基坑工程概况

1.1 基坑周边环境

邯郸市某基坑支护工程位于滏东大街和北仓路交叉口东南角,基坑东侧长约170 m,南侧宽约160 m,北侧宽约78 m,呈近似梯形形状。基坑周长约620 m,面积约20 530 m²,车库地下三层,主楼地下四层。工程±0.0的绝对标高为54.30 m,现自然地坪绝对标高53.80 m左右,车库筏板顶标高39.60 m,主楼筏板顶标高35.60 m,筏板厚700 mm,基坑开挖深度北区约为15.10 m,南区为19.10 m。

基坑北侧为城市主干道北仓路,基坑边距道路路边线约20 m;基坑东侧为拟建施工道路,道路宽度约8.0 m,距基坑边5.60 m,施工道路东侧为商品住宅区,桩基础,最近距基坑边线约35.7 m;基坑南侧西半部分为公安局办事大厅,距基坑边约29.0 m,水泥土搅拌桩复合地基;基坑西侧主要为市政园林绿化区。

基坑周围东、南、西侧地下管线主要是雨水管道和污水管道,距基坑较远,北侧北仓路主要管线从南到北依次为热力管线、雨水管线、污水管线、市政回水用管线,管线埋深2.5~4.0 m不等,距离筏板边约为15.0~20.0 m。

1.2 水文地质工程地质条件

该工程主要地层除表层填土外,上部为第四纪新近沉积土,下部以冲洪积成因的黏性土为主,夹数层厚度不大的砂土层。依据其工程地质特征,基坑支护涉及范围内主要有9个岩土层,其分布埋藏情况简述如下:①素填土:黄褐色,稍湿,松散,以粉质黏土为主,可见砖屑、碎石、白灰等建筑垃圾,层厚1.50~3.10 m,工程性质差;②—⑤粉质黏土:褐黄色,可塑—硬塑,土质较均匀,局部夹粉土夹层,含少量姜石,总层厚10.0~12.40 m,工程性质一般;⑥细砂:灰黄色,饱和,中密,矿物成分以石英、长石为主,层厚0.70~4.30 m,层位稳定,工程性质一般;⑦粉质黏土:黄褐色,可塑—硬塑,土质较均,含少量钙质结核,层厚1.60~5.20 m,层位稳定,工程性质好;⑧细砂:灰黄色,饱和,中密,矿物成分以石英、长石为主,层厚0.60~4.90 m,层位稳定,工程性质好;⑨粉质黏土:黄褐色,可塑—硬塑,局部坚硬,土质较均匀,偶见姜石,干强度及

韧性高,层厚2.60~14.10 m,层位稳定,工程性质较好。场地土层物理力学参数见表1。

勘察期间钻孔内初见水位埋深为5.40~6.10 m,稳定水位埋深为3.5~5.5 m,场地地下水为潜水,以大气降水补给为主。

表1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers

地层编号	地层名称	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
①	填土	18.0	5	10
②—⑤	粉质黏土	19.1~20.4	17.8~23.9	14.7~20.5
⑥	细砂	19.0	0	28
⑦	粉质黏土	20.2	21.4	10
⑧	细砂	19.5	0	30
⑨	粉质黏土	20.2	27.8	14.9

1.3 基坑支护设计施工概况

原基坑支护设计根据地层情况资料、场地周边环境特点,采用单排桩加预应力锚索结构体系进行支护,并采用管井降水与水泥搅拌桩帷幕止水相组合的方式进行地下水防排。

基坑工程重要性等级为一级。基坑周边临时荷载取20 kPa,建筑荷载取20 kPa/层,施工便道路面荷载取40 kPa。为降低工程造价,桩顶及冠梁设置在-2.0 m位置,对桩顶以上基坑进行放坡加喷射混凝土护面。19.10 m深度区域基坑支护采用长32 m,桩径1.0 m,桩间距1.5 m支护桩加6道预应力锚索进行支护,15.10 m深度区域基坑支护采用长22 m,桩径0.8 m,桩间距1.4 m支护桩加4道预应力锚索进行支护,均按现行规程规范进行设计,采用理正深基坑设计软件进行计算,见图1、图2。

在基坑整体开挖至-10.0 m时,由于建筑设计变更,原有基坑深度15.1 m部位有45.0 m宽度范围内由原来的地下三层变为地下四层(图2),深度变更后,原有按-15.10 m基坑深度进行设计的部位,支护桩嵌固深度仅余4.9 m,各种设计指标均不能满足支护要求,但该部位支护桩、冠梁均已施工完成,预应力锚索已经施工3道,土方已经挖至-10.0 m左右,给支护结构补强设计施工带来了较大的挑战。

2 长短组合双排桩对比及优化

2.1 不同构型支护体系对比分析

对原设计进行复核,主要问题是嵌固深度不

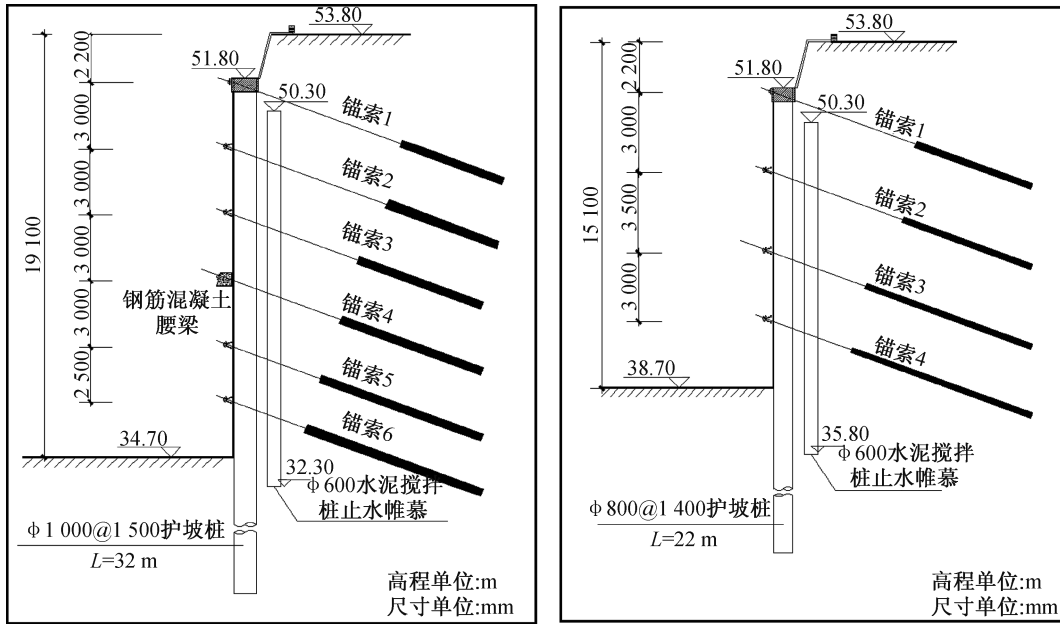


图 1 原支护结构剖面图(19.1 m 深度部分/15.1 m 深度部分)

Fig. 1 Section of old support structure

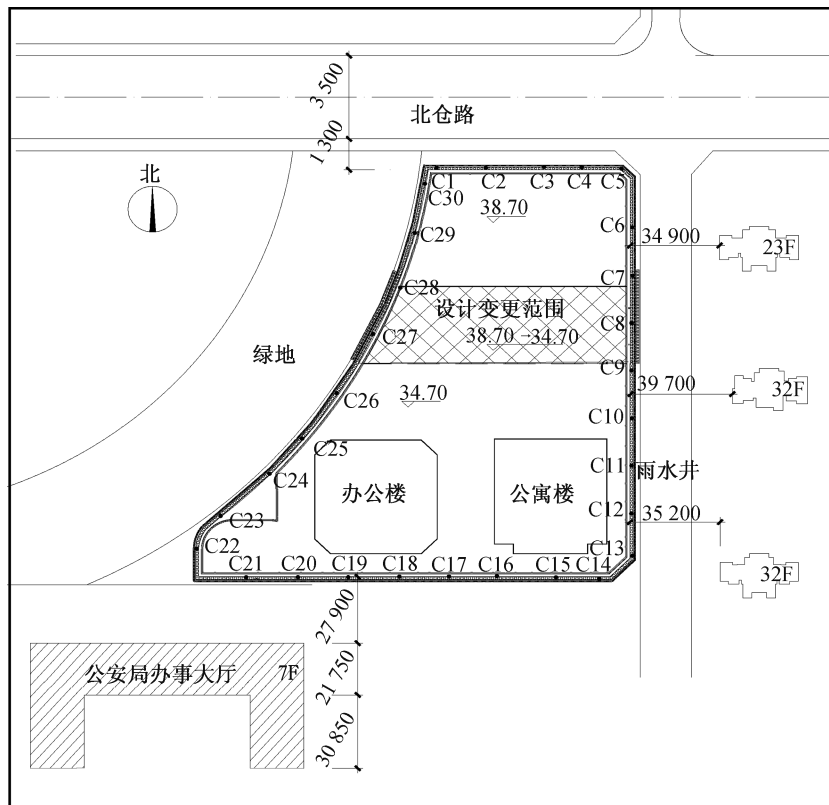


图 2 基坑周边环境及主要监测点布置图(单位:mm)

Fig. 2 Layout of surrounding environment and main monitoring points of foundation pit

足和桩身配筋不足,按照常规,最佳解决方案是重新施工支护桩,但基坑土方已经开挖较深,而且既有 $\Phi 800$ mm 支护桩桩间距 1 400 mm,桩间净空为 600 mm,桩间增加新桩也基本不可能,设计施工难度极大。经过对现场情况的分析,决定采用在现

有支护桩外侧增加一排支护桩,以形成双排桩支护结构来解决问题。

首先,按照常规双排桩体系进行设计,在规范规定的各项指标均满足要求的情况下,试算结果显示设计嵌固深度最小为 11.50 m,即施工桩长不

宜低于 28.5 m。

然后,试算了采用增加一排与现有支护桩同规格 $\Phi 800$ mm 的 22 m 支护桩形成双排桩支护结构,计算结果显示整体稳定性和抗倾覆稳定性满足要求,桩顶水平位移满足要求,但嵌固深度不足,内侧土反力没有保证,对于基坑深度接近 20 m 的情况下,未贸然采用。

在此基础上,提出了增加一排长桩,形成长短组合双排桩的结构型式来解决问题,为保证安全对新增长桩在单独发挥作用下的工况进行了复核,试算结果显示,需要嵌固深度为 14.9 m,可以满足整体稳定性和抗倾覆稳定性要求,但是变形偏大。此工况试算的意义在于,即使双排桩未能发挥应有作用,仅靠外排长桩也能保证最基本的安全度,不至于发生不可控后果。另外,对 3 m 双排桩模型也进行了试算,各项计算指标均非常安全但偏于浪费。

以上各支护体系试算结果主要指标对比见表 2,计算时锚索长度位置按最优配置进行考虑。

设计过程中,对桩身受力情况进行了分析(表 3),发现增加嵌固深度对于调整桩身受力作用不大,计算分析结果验证了双排桩刚架结构中的桩与单排桩的受力特点有较大的区别:锚拉式单排桩在水平荷载作用下只产生弯矩和剪力,而双排桩刚架结构在水平荷载作用下桩的弯矩、剪力远低于单排桩。另外,前排桩桩身更多地承担了被动土压力和锚索预应力带来的弯矩和剪力,而后排桩更多地承担了外侧的主动土压力。

2.2 长短组合双排桩定型及优化

结合前节计算情况,鉴于双排桩的嵌固稳定性验算问题与单排悬臂桩类似,应满足作用在后排桩上的主动土压力与作用在前排桩嵌固段上的被动土压力的力矩平衡条件,与单排桩不同的是,在双排桩的抗倾覆稳定性验算公式中,是将双排桩与桩间土整体作为力的平衡分析对象,考虑了土与桩自重的抗倾覆作用^[14-15],认为采用长短组合双排桩的结构型式来解决该问题是可行的,即:保留前排已施工短桩,在外侧增设长桩,双排桩桩顶设连梁,将内外双排桩连成整体,共同受力以保证支护工程的整体稳定性和变形要求。原有止水帷幕深度不足的问题通过后排桩桩间增设桩径 0.6 m,桩间距 0.4 m 高压旋喷桩解决。

优化过程重点在于桩身配筋,尤其是后排桩,整体受到的剪力和弯矩较低,而且主要集中在中段,上段和下段受力都较小,因此桩身采用三段配筋,上段(0.0~-6.0 m)和下段(-21.0~-32.0 m)经计算可以减筋一半。已经施工的前排桩,经新增锚索(MS-Z1)的预加力调整弯矩后,也使得原有配筋可以满足受力要求,并设混凝土腰梁一道,以增强支护结构的整体变形协调度。

最终方案确定为:前排桩 22.0 m,桩径 0.8 m,桩间距 1.4 m+后排桩 32.0 m,桩径 0.8 m,桩间距 1.4 m 的长短组合双排桩支护结构,预应力锚索 7 道(图 3、图 4、表 4)。设计变更方案进行了专门论证,本地区岩土及结构方面的专家在经过仔细考量后认可了这一补强方式,同意在加强变形监测和坚持信息化施工的条件下采用。

表 2 各支护体系稳定性情况对比

Tab. 2 Comparison of results of double-row piles and single pile

试算模型	支护桩参数	整体稳定性	抗倾覆稳定性	桩顶水平位移/mm	嵌固深度
					(试算值/要求值)/m
双排桩	2×28.5 m $\Phi 800$ @1 400	1.388	1.765	15.38	11.50/11.46
双排桩	2×22.0 m $\Phi 800$ @1 400	1.376	1.734	17.47	4.90/11.46
双排桩	2×32.0 m $\Phi 800$ @1 400	1.469	1.591	11.84	14.90/11.46
单排桩	1×32.0 m $\Phi 800$ @1 400	1.463	1.795	32.71	14.90/13.50

表 3 各支护体系受力情况对比

Tab. 3 Comparison of results of double-row piles and single pile

试算模型	支护桩参数	最大弯矩计算值/(kN·m)		最大剪力计算值/kN		轴力/kN	
		前排桩	后排桩	前排桩	后排桩	前排桩	后排桩
双排桩	2×28.5 m $\Phi 800$ @1 400	386.06	558.85	283.53	186.48	181.31	-181.31
双排桩	2×22.0 m $\Phi 800$ @1 400	386.32	585.73	291.69	154.69	200.55	-200.55
双排桩	2×32.0 m $\Phi 800$ @1 400	384.52	540.24	279.02	216.11	171.71	-171.71
单排桩	1×32.0 m $\Phi 800$ @1 400		866.12		556.68		—

表 4 预应力锚索设计参数一览表

Tab. 4 List of anchor cable design parameters

锚索编号	相对标高/m	预加力/kN	总长/m	锚固段长度/m	轴向内力设计值/kN	备注
MS-1	-2.20	150.0	21.00	12.00	231.13	已施工
MS-2	-5.20	200.0	18.00	10.00	304.07	已施工
MS-Z1	-6.70	250.0	22.00	15.00	390.24	新增
MS-3	-8.20	250.0	22.00	15.00	390.24	已施工
MS-Z2	-11.20	250.0	26.00	20.00	367.27	新增
MS-Z3	-14.20	300.0	28.00	23.00	502.33	新增
MS-Z4	-16.70	300.0	24.00 </td <td>19.00</td> <td>482.38</td> <td>新增</td>	19.00	482.38	新增

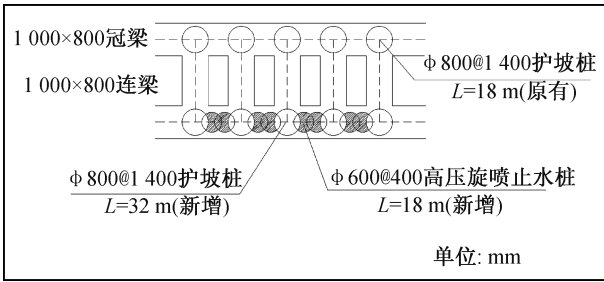


图 3 支护结构桩位大样图

Fig. 3 Pile position of retaining structures

3 施工管控及监测数据分析

由于本基坑支护补强设计采用了超出规范计

算模型的结构型式,而且开挖面积较大、支护深度较深,为保证支护及开挖施工安全进行,后续过程坚持信息化施工,对基坑开挖过程中桩顶进行了加密的水平位移监测和沉降观测。

基坑支护结构补强施工时,首先施工后排长桩和桩间高压旋喷止水帷幕,再施工冠梁、连梁及施工设计变更方案中新增的 MS-Z1 预应力锚索,并对既有锚索预应力进行补张拉。在新增锚索张拉完成后才重新启动挖土工作,整个施工过程中,严格按规范监测,基坑工程顺利开挖至 19.1 m 深度,未发生监测数据报警情况,日常巡检也未发现周边地面异常。管线监测点沉降最大值 2.36 mm,

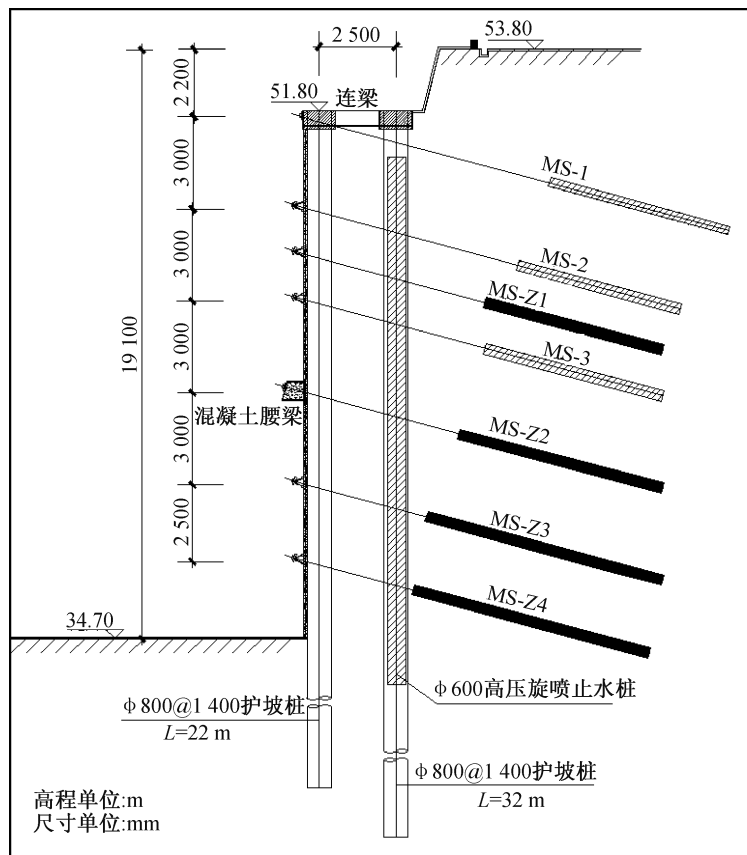


图 4 长短组合双排桩支护结构剖面图

Fig. 4 Section of long and short combined double row pile support structures

建筑物监测点沉降最大值 0.33 mm,对周边环境影响极小。

从监测数据(表5)来看,第一,东侧基坑开挖所引起的双排桩变形整体小于西侧,应该与基坑西侧为阳角大弧的形状有关;第二,双排桩水平变形整体上小于单排桩,单桩顶竖向位移大于双排桩,有可能和本次长短组合双排桩的特殊结构有关,也可能是因为前排桩的轴力为压力,后排桩的轴力为拉力所造成。但整体来讲,监测数据未超出现行规范允许的范围,说明整个基坑支护工程的补充设计及施工过程管理都较为成功。

表5 基坑位移观测数据(部分)

Tab.5 Observation data of foundation pit displacement (partial data)

监测点	桩顶水平位移/mm	桩顶竖向位移/mm
C6	26.57	11.12
C7	13.32	8.19
C8	14.76	19.70
C9	16.57	8.15
C26	31.85	7.07
C27	24.73	15.58
C28	25.85	13.37
C29	30.51	10.27
其余监测点 平均值/最大值	21.89/33.78	6.96/10.34

在上述基础上,进行了整个基坑支护工程设计方案的再思考,假如本工程一开始就采用双排桩方案的话,完全可以采用 2×28.5 m,桩径 0.8 m,桩间距 1.5 m 双排支护桩替代 1×32.0 m,桩径 1.0 m,桩间距 1.5 m 单排支护桩,约增加支护桩混凝土总量 15%,但支护桩钢筋含量降低 20%,预应力锚索总量降低 25%,总概算基本持平,但双排桩在稳定性和变形控制方面优势相当明显。

4 结论

1)通过本工程实例表明,采用长短组合双排桩结构型式处理基坑支护桩嵌固深度不足是可行的,在处理类似情况时可以借鉴,长短组合双排桩能否在常规基坑设计施工中进行推广,还需要更多的工程实例进行验证。

2)根据受力分析及工程实践,当有必要采用长短组合双排桩设计时可以将前排桩以变形控制

为重点、后排桩以整体稳定性为重点进行优化设计;支护桩采用三段配筋可以更加经济。

3)通过对比设计,认为在新近沉积黏性土地区,与单排桩相比双排桩抗侧移刚度远大于单排桩结构,其内力分布优于单排桩锚拉结构,在相同的材料消耗条件下,双排桩的安全性、经济合理性优于单排桩。

参考文献:

- [1] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].
- [2] 刘 钊. 双排支护桩结构的分析及试验研究[J]. 岩土工程学报,1992(5):76-80.
- [3] 应宏伟,初振环. 带撑双排桩支护结构性状分析[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1450-1454.
- [4] 郑 刚,李 欣,刘 畅. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. 建筑结构学报,2004,25(1):99-106.
- [5] 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.
- [6] 郑 刚,程雪松. 长短桩组合排桩悬臂支护工作机理试验研究[J]. 岩土工程学报,2008(S1):410-415.
- [7] 陈富强,杨光华,孙树楷,等. 悬臂式长短组合排桩共同作用的简化设计方法探讨[J]. 广东水利水电,2019(7):1-6.
- [8] 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(S1):97-100.
- [9] 刁 钰,苏奕铭,郑 刚. 主动式斜直交替倾斜桩支护基坑数值研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(S1):161-164.
- [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.
- [11] 杨士萱,王天龙,史三元,等. 邯郸深基坑支护体系的优化设计分析[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2018,35(1):5-8+13.
- [12] 邓小鹏,陈征宙,韦 杰. 深基坑开挖中双排桩支护结构的数值分析与工程应用[J]. 西安工程学院学报,2002(4):42-47.
- [13] 王 军,王 磊,肖昭然. 双排桩支护排距的有限元分析与研究[J]. 地下空间与工程学报,2005(S1):118-121.
- [14] 杜鹏超,彭 勋,马 雷,等. 不同参数对于深基坑双排桩支护结构的变形影响研究[J]. 建筑结构,2021,51(S1):2038-2043.
- [15] 吴 刚,白 冰,聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学,2008,29(10):2753-2758.

(责任编辑 王利君)