

# 冠梁对既有-新增双层排桩支护结构工作特性的影响

孔德森<sup>1,2</sup>, 赵新媛<sup>1,3</sup>, 侯迪<sup>1,4</sup>, 孙添娇<sup>1,5</sup>, 王晓敏<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 中冶东方工程技术有限公司, 山东 青岛 265000;

4. 山东省冶金设计院股份有限公司, 山东 济南 250101; 5. 湖州房总地产开发集团有限公司, 浙江 湖州 313000)

**摘要:**以既有建筑增层开挖为研究背景,采用室内模型试验的方法建立地下空间向下增层既有-新增双层排桩支护结构模型,对地下空间向下增层过程中既有-新增双层排桩支护结构的工作特性进行研究,重点分析冠梁对既有-新增双层排桩支护结构桩顶水平位移和桩身弯矩的影响。研究表明,有冠梁约束时既有支护桩桩顶水平位移曲线比无冠梁约束时更平缓,增设冠梁能够明显减少空间效应对支护结构的影响;增设冠梁后,前后排桩的桩顶水平位移差由 10.43 mm 减少为 0.06 mm,有效提高了前后排桩的整体性;既有支护桩桩顶增设冠梁后,既有支护桩桩身弯矩明显增大,而新增支护桩桩身弯矩变小。

**关键词:**冠梁;向下增层;支护结构;桩顶约束;工作特性

中图分类号:TU473

文献标志码:A

## Influence of crown beam on working characteristics of existing-new double-layer row pile supporting structure

KONG Desen<sup>1,2</sup>, ZHAO Xinyuan<sup>1,3</sup>, HOU Di<sup>1,4</sup>, SUN Tianjiao<sup>1,5</sup>, WANG Xiaomin<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. BERIS Engineering and Research Corporation, Qingdao 265000, China;

4. Shandong Province Metallurgical Engineering Co. Ltd, Jinan 250101, China;

5. Huzhou Real Estate Development Group Co. Ltd, Huzhou 313000, China)

**Abstract:** Taking the excavation of existing buildings as the background, this paper first established a model for the existing-new double-layer row pile supporting structure by means of indoor model experiment. It then studied the working characteristics of the existing-new double-layer row pile supporting structure with downward storey increase in underground space. Finally, it emphatically analyzed the influence of crown beam on the horizontal displacement of pile top and bending moment of pile body of the existing-new double-layer row pile supporting structure. The research shows that the horizontal displacement curve of the top of the existing support pile with crown beam restraint is much smoother than that without crown beam restraint, and that the addition of crown beam can significantly reduce the influence of spatial effect on the supporting structure. After the crown beam is added, the difference of pile

收稿日期:2021-09-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41372288);山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE027)

作者简介:孔德森(1977-),男,山东滕州人,教授,博士,主要从事桩基工程领域的教学与科研工作。

E-mail:dskong828@163.com

top horizontal displacement between the front row piles and the back row piles is reduced from 10.43 mm to 0.06 mm, which effectively improves the integrity of the front row piles and the back row piles. After the crown beam is added to the top of the existing supporting pile, the bending moment of the existing supporting pile increases obviously, while the bending moment of the newly added supporting pile decreases.

**Key words:** crown beam; downward storey increase; supporting structure; pile top constraint; working characteristics

随着中国经济的不断发展,城市化水平也在不断提高,城市人口急剧膨胀,人们的生存空间日渐拥挤,很多城市出现建筑用地紧张的现象<sup>[1]</sup>。而地下空间拥有独特的资源优势,能够提供更多的生活空间<sup>[2]</sup>。地下空间向下增层不仅可以保持既有建筑物的风貌,还能有效地利用地源热泵节约资源,具有良好的发展前景。在既有建筑地下空间向下增层过程中,原有的支护桩不足以承担二次开挖所产生的侧向土压力,需在原有支护桩外围补入新的支护桩,形成既有-新增双层排桩支护结构,其与普通的双排桩结构形式组成相似,但工作特性有很大不同。

国内外学者对双排桩支护结构进行了相关研究,并且取得了一定的成果。申永江等<sup>[3]</sup>根据基坑监测数据得出双排桩支护结构中前后排桩的受力和变形有显著差异的结论。左殿军等<sup>[4]</sup>通过对工程实测数据的研究发现后排桩的嵌固深度对支护结构的承载性状有很大影响。Bose等<sup>[5]</sup>、Ou等<sup>[6]</sup>采用有限元分析软件对双排桩支护基坑开挖过程进行模拟,分析了基坑开挖深度、桩间距等因素对双排桩支护结构的影响。Ooi等<sup>[7]</sup>研究了基坑开挖作用下双排桩的受力及变形规律,发现增加排距可以有效限制双排桩产生水平位移。聂庆科等<sup>[8]</sup>通过FLAC软件对基坑开挖双排桩支护结构进行了模拟,由数值计算结果可知双排桩的反弯点大致在开挖深度位置,并发现冠梁是影响双排桩支护结构的关键因素。吴铭炳等<sup>[9]</sup>在地下空间向下增层工程中,在原有支护桩后补入新的支护桩形成双排长短桩支护结构,该组合支护结构会形成土拱效应,从而对土压力的分布产生影响。目前对于新建基坑中双层排桩的研究较多,而对既有地下空间向下增层工程中的双层排桩支护结构研究尚少。

采用室内模型试验建立既有地下空间向下增层双层排桩组合支护结构模型,对增层开挖条件下的既有-新增双层排桩的工作特性开展研究,主要分析在空间效应作用下,既有支护桩桩顶有无冠梁约束对既有-新增双层排桩组合支护结构的桩顶水平位移、桩身弯矩等承载特性的影响。

## 1 模型试验概况

以既有建筑增层开挖为研究背景,建立地下空间向下增层既有-新增双层排桩支护结构模型。模型试验采用自制大型试验槽模拟既有地下空间向下增层改造工况,采用硬聚氯乙烯管(polyvinyl chloride管,PVC管)作为模型桩,采用定位钻孔木板作为模型冠梁,通过监测增层开挖过程中模型桩的桩顶水平位移和桩身弯矩,研究冠梁对地下空间向下增层双层排桩组合支护结构工作特性的影响。

### 1.1 试验装置

试验槽由砖体砌成,平面尺寸为3 m×3 m,高1.6 m,如图1所示。采用高速静态应变仪采集试验过程中测试桩桩身应变数据,共120个通道,分辨率为0.1 με,温度漂移≤±1 με/℃(半桥条件下)。采用百分表监测测试桩桩顶位移数据。布置支护桩时,使既有支护桩和新增支护桩的桩顶高出地表5 cm,用于安设百分表,百分表量程为30 mm,精度为0.01 mm。增层开挖可能导致支护桩桩顶位移过大,当位移将要超出百分表量程时需要重置百分表<sup>[10]</sup>。



图1 模型试验槽

Fig. 1 Trough for model experiment

## 1.2 模型试验土的选择

试验用土取自青岛市黄岛区,试验前筛去土中杂物。试验槽内回填土体时,土体处于自然松散状态。开挖过程中,在不同开挖深度用环刀取土,进行土工试验。通过室内三轴压缩试验和密度试验,得到土体的基本力学参数,见表1。

表1 土体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of soil

土体名称	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	含水率/%	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
试验土	12	18	8	15.7

## 1.3 模型桩与冠梁的制作

模型桩采用外直径为32 mm、壁厚1.2 mm的PVC管。既有支护桩的桩长65 cm,实际埋深60 cm;新增支护桩的桩长105 cm,实际埋深100 cm。为采集桩身弯矩,取部分模型桩作为测试桩,在测试桩两侧外壁上每隔10 cm布置测点,每个测点对称贴单轴应变片组成1/2桥路,测点布置如图2。导线采用普通排线,将导线一端与应变片的端子焊接,并用胶带将导线固定在模型桩桩身上,从而避免导线扰动应变片<sup>[11]</sup>。最后,在应变片表面均匀涂抹防水胶,以免应变片受潮破坏。支护桩桩顶冠梁用141 cm×7 cm×1.2 cm(长×宽×高)复合木质板加工而成,用钻孔器在预设桩位处开孔,孔径为32 mm,孔中心距为6 cm,如图3所示。固定支护桩时,用胶带逐层缠绕在支护桩和冠梁的连接处,确保支护桩卡在冠梁上无法转动<sup>[12]</sup>。

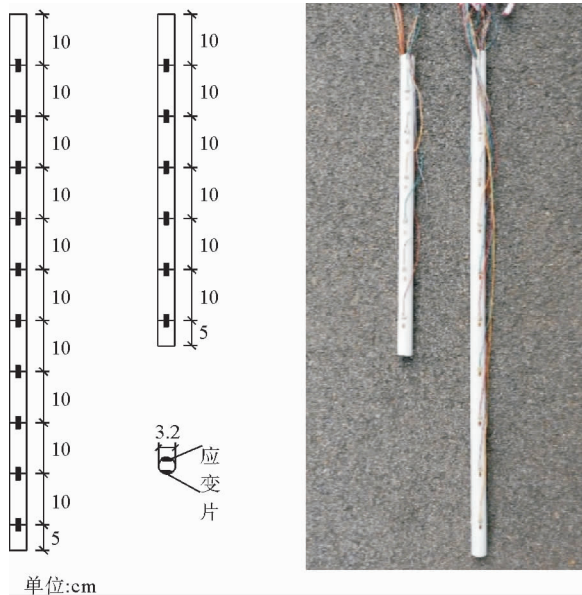


图2 模型桩测点布置图

Fig. 2 Layout of measuring points of model pile

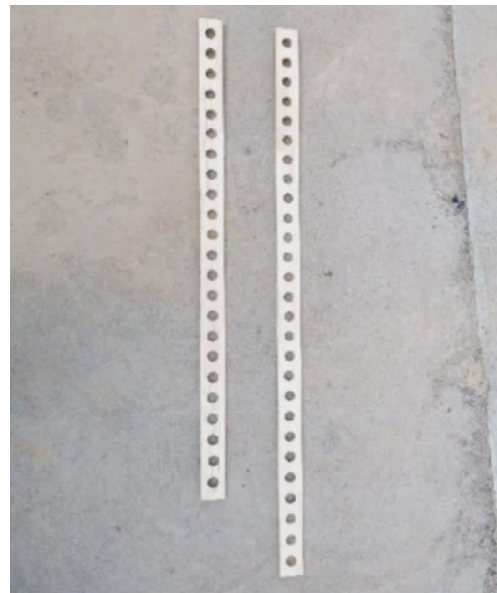


图3 冠梁实图

Fig. 3 Real diagram of crown beam

## 1.4 试验工况与试验方法确定

试验模型桩平面布置如图4所示。试验选取的既有基坑的尺寸为132 cm×132 cm,各边等距分布23根既有支护桩,桩中心距 $S_1=6$  cm,既有开挖空间深度为 $H_1=20$  cm。试验所需的装置、材料、设备等准备完毕后,将前排既有支护桩按预设平面位置放置于试验槽中,其中桩身安设应变片的测试桩有6根,等距布置于基坑一侧半边。将试验用土均匀松散的铺撒在试验槽内,埋设前排既有支护桩至桩顶以下5 cm处,测试桩贴有应变片的两侧分别为开挖迎土面和背土面。待土体沉降稳定后,开挖既有空间深度20 cm,形成

既有地下空间,模型静置 1 天。稳定后,在既有支护桩的外围按预设平面位置补入新增支护桩,其桩径、材质与既有支护桩相同,桩长稍大,桩中心距  $S_2=9$  cm,桩排距  $B=12$  cm,其中有 5 根应变测试桩。在位移测试桩桩顶安装百分表,以监测桩顶位移变化。再逐步进行分层开挖直至增层开挖深度  $H_2=30$  cm。其中,中心桩位于基坑边中点,既有普通桩距既有中心桩 36 cm,既有边角桩距既有中心桩 60 cm;新增普通桩距新增中心桩 36 cm,新增边角桩距新增中心桩 63 cm。

采用分层开挖的方式,每层开挖 10 cm,开挖后静置 1 天,待土体稳定后再开挖下一层土体,增层开挖深度至 20 cm 后,以 5 cm 每层开挖至增层开挖深度为 30 cm,数据监测伴随整个开挖过程。

## 2 模型试验结果分析

为了研究冠梁对支护桩受力性状的影响,取两组试验进行研究,一组既有支护桩桩顶无冠梁约束,另一组在既有支护桩桩顶设置冠梁,两组试验中新增支护桩桩顶均无冠梁约束,且其他条件均相同,如图 5 所示。通过两组试验得到的两级支护桩的桩顶位移曲线和桩身弯矩曲线,分析既有支护桩有无冠梁约束对整个支护结构的影响。

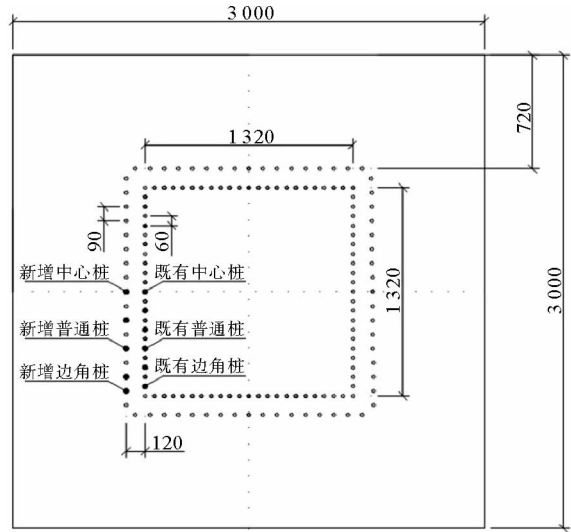


图 4 模型桩平面布置图  
Fig. 4 Layout plan of model pile

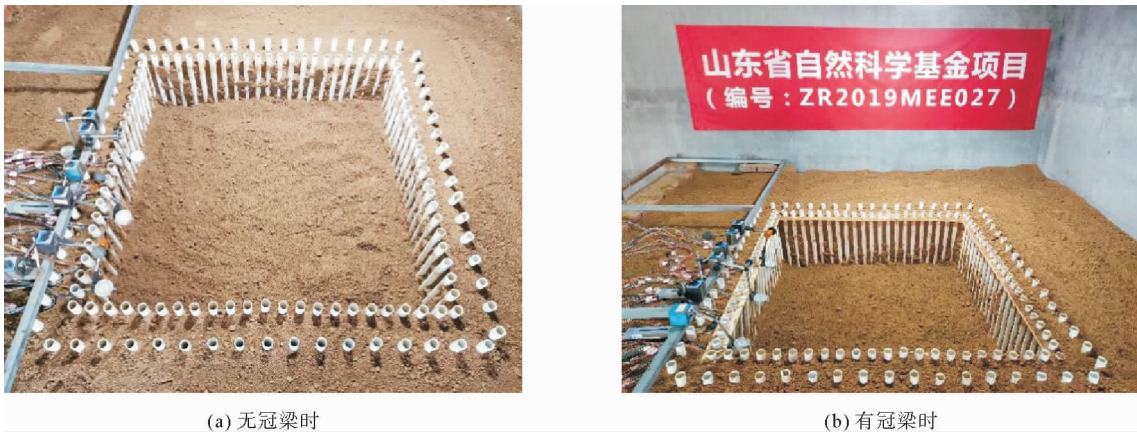


图 5 试验槽内布桩图  
Fig. 5 Pile layout drawing in experimental trough

### 2.1 桩顶位移变化规律

冠梁在支护体系中的作用是巨大的<sup>[13]</sup>。冠梁的设置能够极大地增强排桩的整体刚度,还能够有效减少基坑支护结构的水平变形,尤其是对桩顶位移的约束作用极其明显<sup>[14]</sup>。

通过试验监测数据得到既有支护桩桩顶无冠梁约束和有冠梁约束时,不同位置支护桩桩顶水平位移变化规律,如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,既有支护桩无冠梁约束时,既有支护桩和新增支护桩受空间效应影响,表现为中心桩桩顶位移最大,普通桩次之,边角桩最小的现象。由图 7(a)可知,在基坑空间效应作用下,既有支护桩虽然有冠梁的约束,桩顶位移分布仍呈现中心桩最大、边角桩最小的趋势。由图 7(b)可以看

出,新增支护桩也受空间效应的影响,呈相同的趋势。

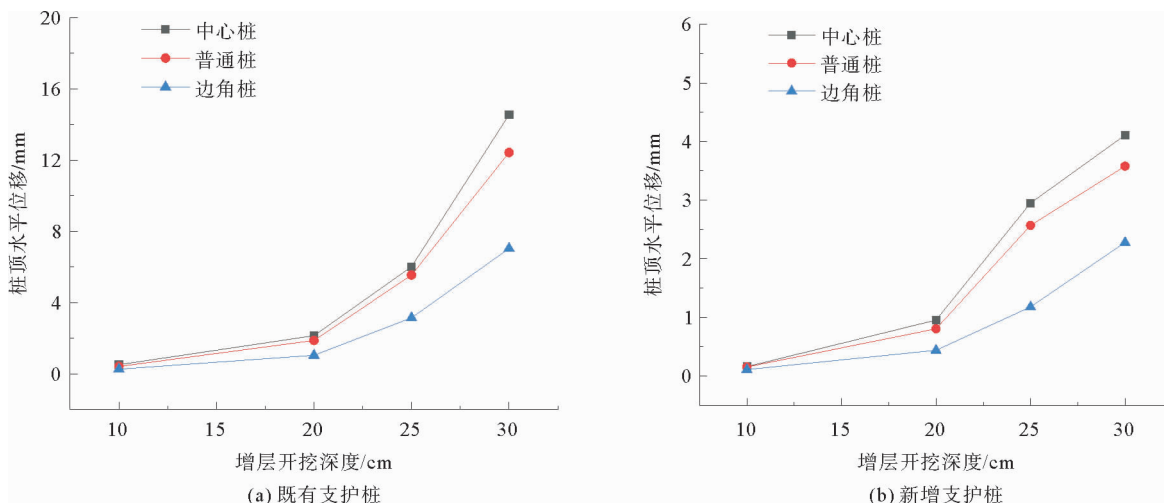


图 6 无冠梁时不同位置处支护桩桩顶水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of supporting pile top at different positions without crown beam

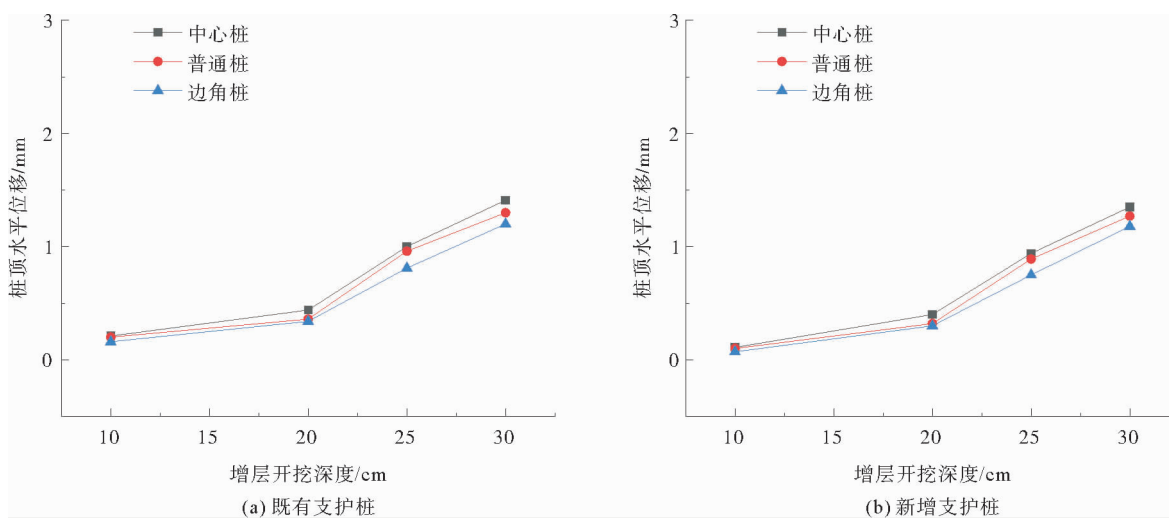


图 7 有冠梁时不同位置处支护桩桩顶水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of supporting pile top at different positions with crown beam

对比图 6 和图 7 可知,不加冠梁时,既有支护桩的桩顶最大水平位移为 14.54 mm,新增支护桩的桩顶最大位移为 4.21 mm;在既有支护桩桩顶增设冠梁后,既有支护桩的桩顶最大水平位移减少为 1.41 mm,新增支护桩的桩顶最大位移降低为 1.35 mm,说明在既有支护桩上增设冠梁能够提高既有支护桩的整体稳定性,大大降低了既有支护桩的水平位移,进而限制了新增支护桩水平位移的产生,使整个支护结构的支护能力得到很大提升。对比图 6 和图 7 可知,两种工况下,中心桩桩顶位移差距最大,边角桩桩顶位移差距最小,由此可知,中间位置处冠梁的约束作用最强,越靠近坑角约束作用越小。因此,冠梁可设计成截面中间大两头小的变截面梁;中间位置处梁的配筋可相对增大,坑角位置处配筋可相对减小。

因试验模型为对称模型,可以看作支护桩的桩顶水平位移是沿基坑边中心点对称分布的。以中心桩位置处作为零点,增层开挖 30 cm 时既有支护桩桩顶无冠梁约束和有冠梁约束情况下沿基坑边分布的支护桩桩顶水平位移变化规律如图 8 所示。由图 8(a)可知,桩顶自由时,沿基坑边分布的既有支护桩桩顶水平位移曲线较陡,而新增支护桩桩顶水平位移曲线相对平缓,说明桩顶无约束时,在基坑开挖卸荷的作用下,既有支护桩比新增支护桩受空间效应的影响更为明显。由图 8(b)可知,有冠梁约束时既有支护桩桩顶水平位移

曲线比无冠梁约束时平缓很多,说明既有支护桩增设冠梁能够明显减少空间效应的影响。

对比图 8(a)和 8(b)可知,桩顶自由的既有支护桩与新增支护桩在中心桩、普通桩、边角桩位置处的桩顶位移差分别为 10.43、8.84 和 4.75 mm,而增设冠梁的既有支护桩与新增支护桩的桩顶位移差分别为 0.06、0.03 和 0.02 mm。由此可知,不论桩顶有无约束,两排桩位移差都表现为中心位置处最大,边角位置处最小。但桩顶有约束时,两排桩位移差要明显小于无约束时,说明增加冠梁能够减小前后排桩的位移差,有效提高前后排桩的整体性,从而增强支护能力。

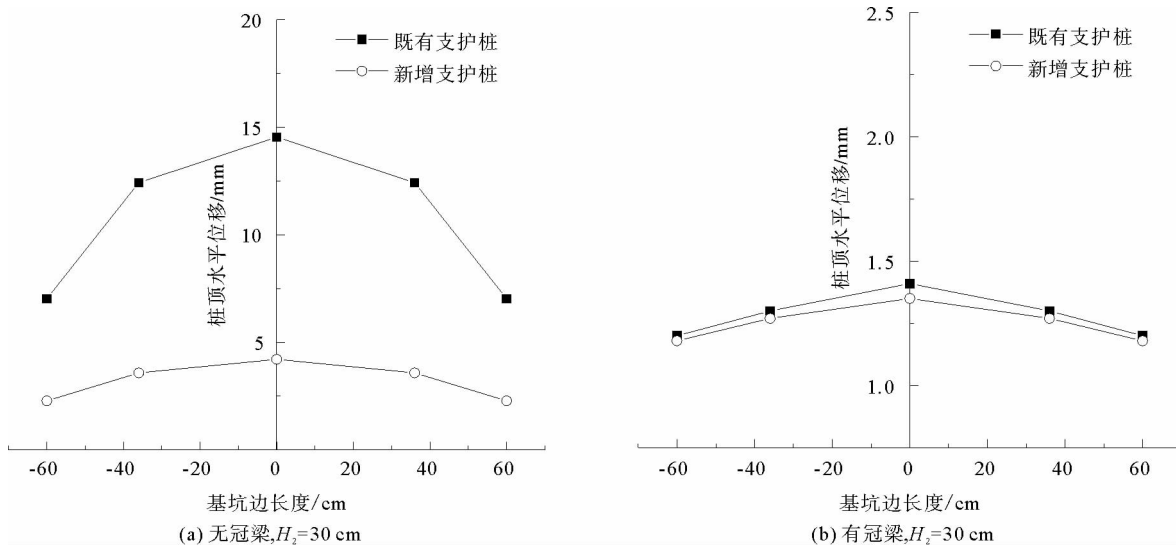


图 8 不同位置处支护桩桩顶水平位移图

Fig. 8 Horizontal displacement of supporting pile top at different positions

### 2.2 桩身弯矩变化规律

冠梁能够将离散的支护桩结合在一起,使其共同作用<sup>[15]</sup>。冠梁的存在不仅可以改善支护结构的变形特性,减少支护结构的水平变形,还会影响支护桩的桩身内力分布。

既有支护桩桩顶无冠梁约束时,不同位置处既有支护桩桩身弯矩分布如图 9 所示。由图 9 可知,既有支护桩无冠梁约束时,既有支护桩的桩身弯矩呈弓型分布。增层开挖深度为 10、20、25、30 cm 时,中心桩、普通桩、边角桩的桩身最大弯矩分别出现在埋深 25、35、35、35 cm 处,中心桩最大弯矩分别为 10.92、25.16、49.00、59.40 N·cm,普通桩最大弯矩分别为 10.28、21.45、41.00、55.16 N·cm,边角桩最大弯矩分别为 10.80、18.20、33.84、49.36 N·cm。由此可知,随着增层开挖深度的增大,桩身最大弯矩值点深度呈增大的趋势。当开挖深度较小时(H<sub>2</sub>=10 cm),中心桩、普通桩、边角桩的最大桩身弯矩值相差不大,且无明显变化;当开挖深度较大时(H<sub>2</sub>=20 cm、H<sub>2</sub>=25 cm、H<sub>2</sub>=30 cm),桩身最大弯矩表现为中心桩的弯矩最大,其次为普通桩,边角桩最小。

既有支护桩桩顶无冠梁约束时,不同位置处新增支护桩桩身弯矩分布如图 10 所示。由图 10 可知,新增支护桩在增层开挖作用下桩身弯矩呈弓型分布。增层开挖深度为 10、20、25、30 cm 时,中心桩、普通桩、边角桩的桩身最大弯矩均出现在埋深 65 cm 处,中心桩的最大弯矩分别为 14.60、49.08、79.28、113.20 N·cm,普通桩的最大弯矩分别为 14.18、43.88、65.68、84.61 N·cm,边角桩最大弯矩分别为 7.03、23.32、37.38、56.23 N·cm。由于测点有限,新增支护桩桩身最大弯矩值点集中出现在埋深 65 cm 处,无法直接看出增层开挖对新增支护桩桩身最大弯矩值出现点的影响。新增支护桩的桩身最大弯矩随着增层开挖深度的增加而逐渐增大。在同一开挖深度时,新增支护桩的中心桩桩身弯矩最大,普通桩次之,边角桩最小。但无论中心位置还是边角位置,新增支护桩的桩身弯矩都要大于既有支护桩,说明既有支护桩桩顶无约束时,新增支护桩为主要的受力结构。

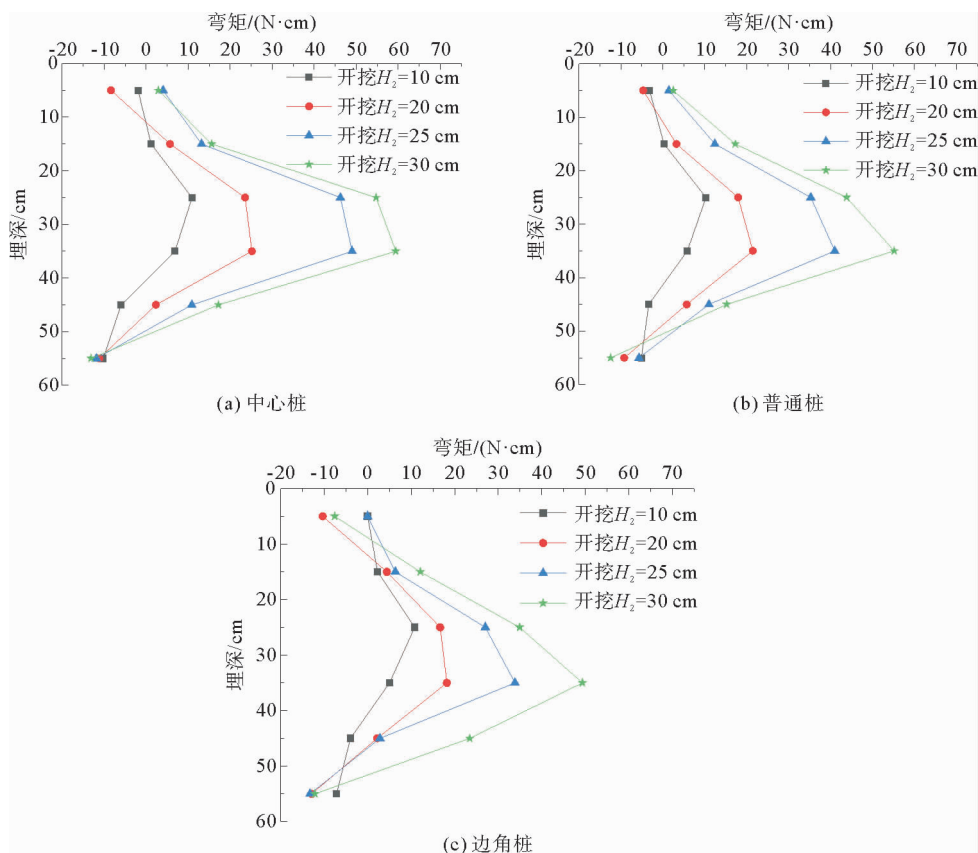


图 9 无冠梁时既有支护桩桩身弯矩

Fig. 9 Bending moment of existing supporting piles without crown beam

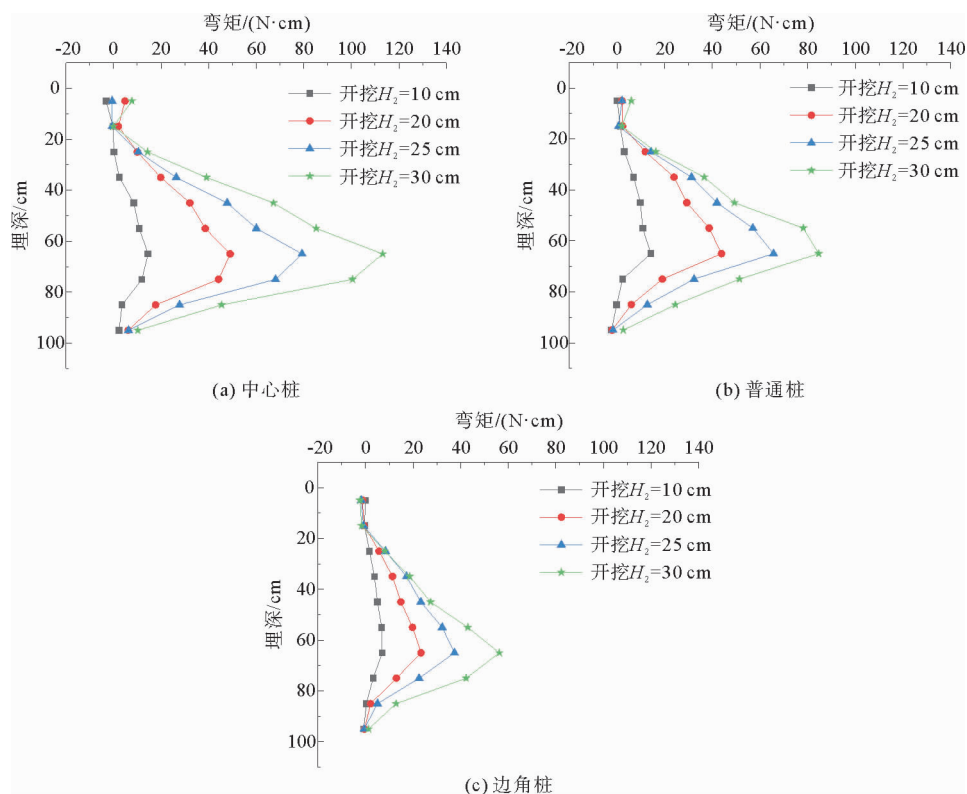


图 10 无冠梁时新增支护桩桩身弯矩

Fig. 10 Bending moment of newly added supporting piles without crown beam

既有支护桩有冠梁约束时不同位置处既有支护桩桩身弯矩分布如图 11 所示。由图 11 可知,既有支护桩桩顶设置冠梁约束后,桩身弯矩仍呈中间大、两边小的趋势分布。增层开挖深度为 10、20、25、30 cm 时,中心桩的桩身最大弯矩分别出现在埋深 25、25、35、35 cm 处,中心桩的最大弯矩分别为 34.84、79.12、118.08、156.88 N·cm;普通桩的桩身最大弯矩分别出现在埋深 25、25、25、35 cm 处,普通桩的最大弯矩分别为 37.81、78.47、107.38、141.13 N·cm;边角桩的桩身最大弯矩分别出现在埋深 25、25、25、25 cm 处,边角桩最大弯矩分别为 38.45、77.22、99.24、122.87 N·cm。由此可知,中心桩的桩身最大弯矩值点随开挖深度的增加而增大的趋势最为明显,普通桩次之,而边角桩无明显增长趋势。同一开挖深度下,当开挖深度较小时( $H_2 = 10\text{ cm}$ 、 $H_2 = 20\text{ cm}$ ),中心桩、普通桩、边角桩的最大桩身弯矩值相差不大,且无明显变化规律;当开挖深度较大时( $H_2 = 25\text{ cm}$ 、 $H_2 = 30\text{ cm}$ ),桩身最大弯矩变化具有明显规律,表现为中心桩的弯矩最大,普通桩次之,边角桩最小。

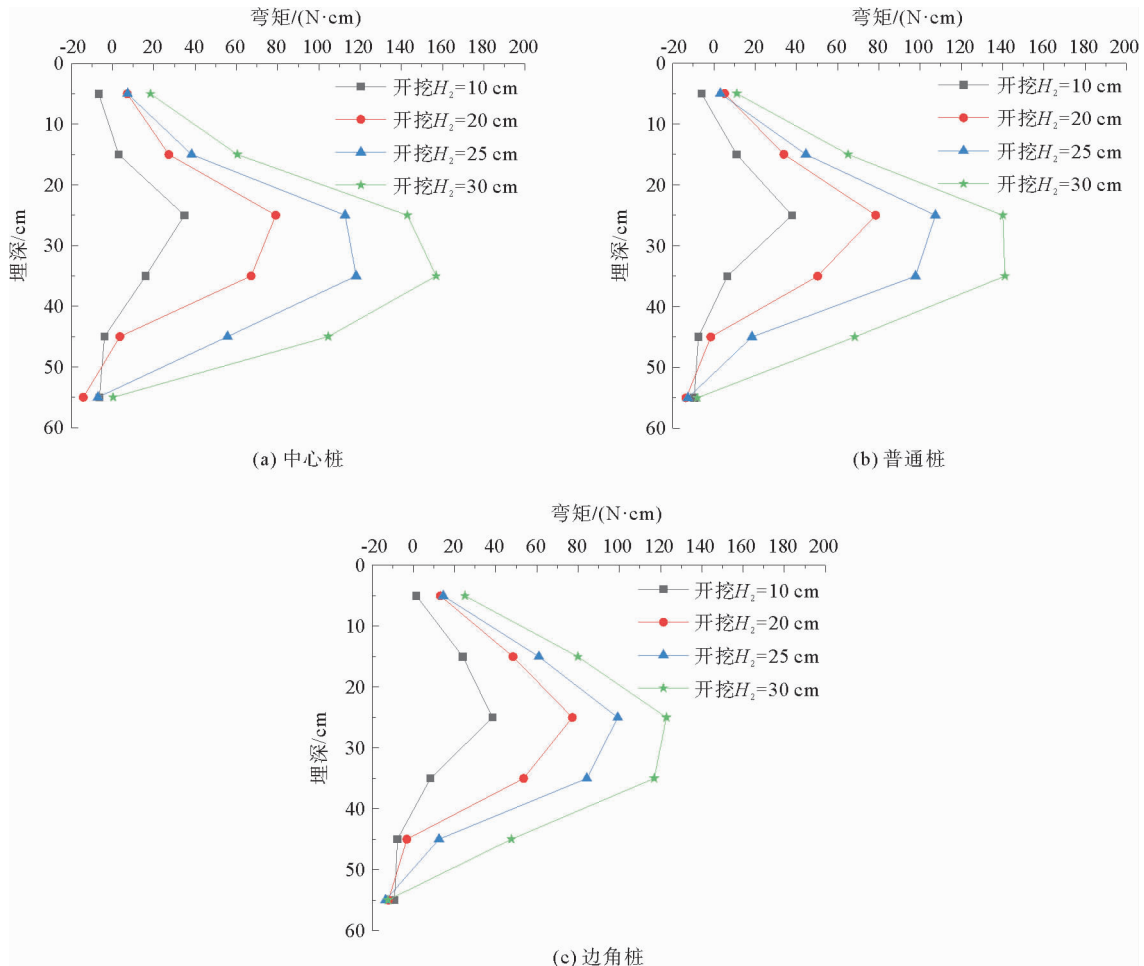


图 11 有冠梁时既有支护桩桩身弯矩

Fig. 11 Bending moment of existing supporting piles with crown beam

既有支护桩有冠梁约束时不同位置处新增支护桩桩身弯矩分布如图 12 所示。由图 12 可知,新增支护桩在增层开挖作用下桩身弯矩呈弓型分布。增层开挖深度为 10、20、25、30 cm 时,中心桩的桩身最大弯矩分别出现在埋深 55、55、55、65 cm 处,最大弯矩分别为 9.24、22.64、39.36、56.12 N·cm;普通桩的桩身最大弯矩分别出现在埋深 55、55、55、65 cm 处,最大弯矩分别为 5.74、17.91、30.02、44.64 N·cm;边角桩的桩身最大弯矩分别出现在埋深 65、65、65、65 cm 处,最大弯矩分别为 5.77、13.03、22.42、30.78 N·cm。由此可知,在同一开挖深度时,新增支护桩的中心桩的桩身弯矩最大,其次普通桩,边角桩最小。并且在各个对应位置处的既有支护桩的桩身弯矩都要大于新增支护桩,说明既有支护桩桩顶有冠梁约束时,既有支护桩是承担桩



背土压力的主要结构<sup>[16]</sup>。

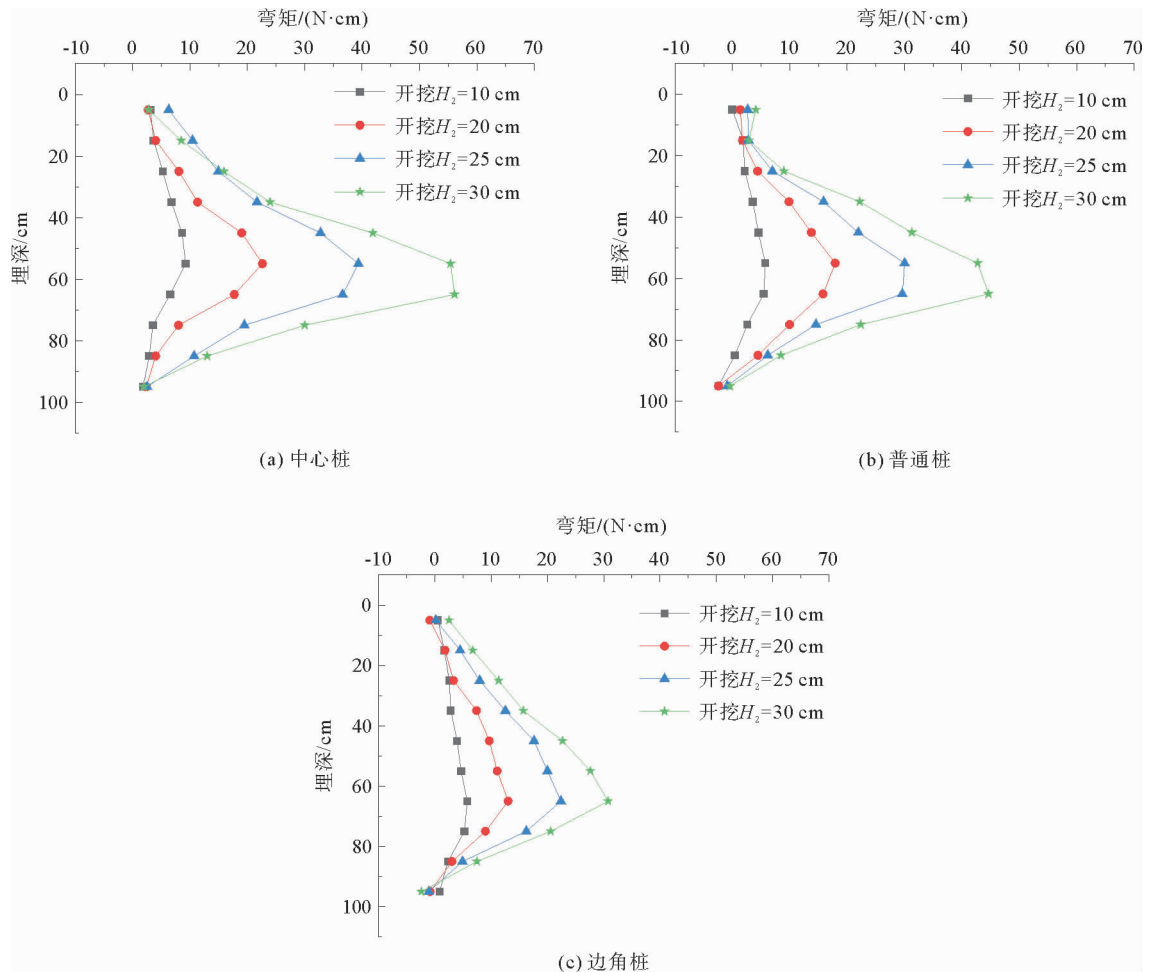


图 12 有冠梁时新增支护桩桩身弯矩

Fig. 12 Bending moment of newly added supporting piles with crown beam

对比图 9~12 可以发现,既有支护桩桩顶增设冠梁后,既有支护桩桩身弯矩比桩顶自由时明显增大,而新增支护桩桩身弯矩比桩顶自由时要小。这是因为既有支护桩在冠梁约束作用下发生的变形极小,使得前后排桩之间的土体一直保持密实状态,既有支护桩与新增支护桩相互作用较强。由于前后排桩排间土体因冠梁约束而保持密实,使排间土体传递土压力的能力增强,从而既有支护桩承担新增支护桩传递过来的荷载增大,因此既有支护桩桩身弯矩大幅增大。新增支护桩承担的桩后土体产生的主动土压力被两排桩之间土体产生的被动土压力抵消一部分,因此新增支护桩桩身弯矩变小。

### 3 结论

采用室内模型试验建立了地下空间向下增层既有-新增双层排桩支护结构模型,研究了在空间效应下冠梁对既有-新增双层排桩支护结构工作特性的影响,得出的主要结论如下。

- 1) 既有支护桩桩顶增设冠梁能够明显减少空间效应对支护结构的影响。
- 2) 增加冠梁能够减小前后排桩的桩顶位移差,有效提高前后排桩的整体性,从而增强支护能力。
- 3) 既有支护桩桩顶增设冠梁后,既有支护桩桩身弯矩比桩顶自由时明显增大,而新增支护桩桩身弯矩比桩顶自由时减小。

## 参考文献:

- [1] 贾强,张鑫,夏凤敏,等.济南商埠区历史建筑地下增层工程设计与施工[J].山东建筑大学学报,2014,29(5):464-469.  
JIA Qiang,ZHANG Xin,XIA Fengmin,et al.Project design of adding basement of existing buildings by steel tubular pile underpinning technology[J].Journal of Shandong Jianzhu University,2014,29(5):464-469.
- [2] 薛治柱,郭同斌,刘贯祥.旧房改造及地下增层施工技术[J].建筑施工,1994,16(6):38-41.  
XUE Zhizhu,GUO Tongbin,LIU Guanxiang.Construction technology of old house reconstruction and basement addition [J].Building Construction,1994,16(6):38-41.
- [3] 申永江,杨明,项正良.双排长短组合桩与常见双排桩的对比研究[J].岩土工程学报,2015,37(增2):96-100.  
SHEN Yongjiang,YANG Ming,XIANG Zhengliang.Comparative study on double-row piles with different lengths several common anti-slide piles[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(S2):96-100.
- [4] 左殿军,邓成发.不同嵌固深度排桩受力与变形特性现场试验研究[J].岩土工程学报,2014,36(增2):354-359.  
ZUO Dianjun,DENG Chengfa.Field test mechanical properties and deformation characteristics of double-row piles with different embedded depths[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2014,36(S2):354-359.
- [5] BOSE S K,SOM N N.Parametric study of a braced cut by finite element method[J].Computer and Geotechnics,1998,22(2):91-107.
- [6] OU C Y,CHIOU D C,WU T S.Three-dimensional finite element analysis of deep excavations[J].Journal of Geotechnical Engineering,1996,122(5):337-345.
- [7] OOI P S K,CHANG B K F,WANG S.Simplified lateral load analyses of fixed-head piles and pile groups[J].Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering,2003,130(11):1149-1151.
- [8] 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,2008,30(11):3089-3094.  
NIE Qingke,HU Jianmin,WU Gang.Deformation and earth pressure of double-row piles retaining structure for deep excavation[J].Rock and Soil Mechanics,2008,30(11):3089-3094.
- [9] 吴铭炳,林颖孜,戴一鸣,等.软土地基地下室加层的基坑支护[J].岩土工程学报,2010,32(增1):210-214.  
WU Mingbing,LIN Yingzi,DAI Yiming,et al.Supports of a foundation pit of story-adding basement in soft soil[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(S1):210-214.
- [10] 谢征兵.地下增层开挡式开挖条件下桩-土材料承载特性[D].杭州:浙江理工大学,2017.  
XIE Zhengbing.Bearing characteristics of pile and soil materials subjected to pile-supported excavation for underground storey supplement[D].Hangzhou:Zhejiang Sci-Tech University,2017.
- [11] 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(增1):763-767.  
ZHENG Xuan,ZHU Wenxiu,ZHOU Yijun.Model test study on deformation mechanism of double-row-piles wall[J].Building Structure,2018,48(S1):763-767.
- [12] 伍程杰.增层开挖对既有建筑桩基承载性状影响研究[D].杭州:浙江大学,2014.  
WU Chengjie.Influence of excavation on the bearing behavior of existing building pile foundation[D].Hangzhou:Zhejiang University,2014.
- [13] 孔俊强.双排桩支护深基坑开挖对邻近地铁隧道结构安全影响分析[J].市政技术,2019,37(4):232-236.  
KONG Junqiang.Impact analysis of deep foundation pit by double row piles on the structural safety of adjacent metro tunnel[J].Municipal Engineering Technology,2019,37(4):232-236.
- [14] 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.
- [15] 刘青松,矫伟刚,盛志战.双排桩冠梁刚度分析及抗倾覆优化计算[J].工程勘察,2020,48(6):19-23.  
LIU Qingsong,JIAO Weigang,SHENG Zhizhan.Stiffness analysis on crown beam with double-row piles and the anti-overturning optimization calculation[J].Geotechnical Investigation & Surveying,2020,48(6):19-23.
- [16] 向富宝.邻近铁路隧道的深基坑双排桩支护结构变形规律及优化设计分析[J].建筑施工,2020,42(2):159-161.  
XIANG Fubao.Deformation law and optimal design analysis of double row piles supporting structure in deep foundation pit adjacent to railway tunnel[J].Building Construction,2020,42(2):159-161.

(责任编辑:吕海亮)